



TUGAS AKHIR – TM 091585

INVESTIGASI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS
DENGAN VARIASI JUMLAH STAGE DAN
KECEPATAN ANGIN

MUCHAMMAD IMAM SURYA WIJAYA
NRP 2112 100 069

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani, ST., ME., Ph.D.

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT – TM 091585

NUMERICAL INVESTIGATION OF SAVONIUS WIND
TURBINE WITH VARIATION OF STAGE NUMBER
AND WIND SPEED

MUCHAMMAD IMAM SURYA WIJAYA
NRP 2112 100 069

Supervisor
Vivien Suphandani, ST., ME., Ph.D.

Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

**INVESTIGASI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS
DENGAN VARIASI JUMLAH STAGE DAN
KECEPATAN ANGIN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MUCHAMMAD IMAM SURYA WIJAYA

NRP. 2112 100 069

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD (Pembimbing)
NIP. 198105292003122001
 2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Penguji I)
NIP. 197104051997021001
 3. Dr. Bambang Arip Dwiyanoro, ST, M.Eng. (Penguji II)
NIP. 197804012002121001
 4. Prof. Dr. Ir. Sutardi, M.Eng. (Penguji III)
NIP. 196412281990031002
- 

SURABAYA

JANUARI, 2017

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

INVESTIGASI NUMERIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN VARIASI JUMLAH STAGE DAN KECEPATAN ANGIN

Nama Mahasiswa : Muchammad Imam Surya Wijaya
NRP : 2112 100 069
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, S.T., ME., Ph.D.

Abstrak

Turbin angin yang hadir menjadi salah satu pilihan untuk alternatif sumber energi khususnya energi listrik yang bersifat micro maupun macro bagi wilayah Indonesia. *Vertical Axis Wind Turbin* (VAWT) yang memiliki bentuk *compact* mulai menarik perhatian para peneliti untuk dikembangkan lebih lanjut guna mengejar permintaan akan energi listrik yang besar. Namun, operasi VAWT pada kondisi angin di wilayah Indonesia yang sering berubah arah ini masih menjadi sebuah tantangan yang menghalangi implementasi dari VAWT itu sendiri, ditambah lagi dengan perubahan kecepatan angin yang cukup sering terjadi di daerah perkotaan dan sekitarnya. Tantangan-tantangan tersebut menjadi sebuah target yang hendak dicapai untuk mewujudkan sebuah desain VAWT yang dapat beroperasi secara optimal di wilayah Indonesia ini.

Simulasi numerik dilakukan pada aliran yang melewati sebuah VAWT secara tiga dimensi dengan bantuan *software* STAR CCM+ 9.02.007-R8. Turbin angin yang digunakan adalah model Savonius tipe S dengan dua sudu yang divariasikan jumlah *stage* sebanyak satu, dua dan tiga *stage* pada rotornya. Kecepatan angin menggunakan nilai sebesar 5, 10 dan 15 m/s. Permodelan simulasi yang digunakan adalah *unsteady, incompressible flow* dengan permodelan turbulensi aliran yang dipilih adalah *k-omega Shear-Stress Transport* (SST). Rotor turbin yang berputar

dimodelkan sebagai *rotation wall* dengan kecepatan putaran yang berubah sesuai dengan kecepatan angin datang.

Dari simulasi ini didapatkan hasil analisa berupa perbedaan hasil simulasi secara 2D dan 3D dalam aspek performa dan fenomena aliran pada konstruksi *Single Stage*, selain itu juga hasil secara kualitatif yang merepresentasikan kontur dan *streamline* aliran angin yang melewati turbin yang berputar juga data kuantitatif berupa nilai torsi dan koefisien daya yang digunakan untuk menganalisis performa dari ketiga model VAWT Savonius. Performa terbaik dari operasi VAWT Savonius pada penelitian ini dicapai pada TSR 0,39 dengan nilai Koefisien Daya sebesar 0,102 pada konstruksi rotor *Dual Stage*.

Kata Kunci : Turbin Angin Savonius, Stage, Torsi, Koefisien daya (CP), Tip Speed Ratio (TSR).

NUMERICAL INVESTIGATION OF SAVONIUS WIND TURBINE WITH VARIATION OF STAGE NUMBER AND WIND SPEED

Student Name : Muchammad Imam Surya Wijaya
NRP : 2112 100 069
Department : Teknik Mesin
Supervisor : Vivien Suphandani, S.T., ME., Ph.D.

Abstract

Wind turbine comes to become an alternative for the electrical energy resource both micro and macro scale in Indonesia. Vertical Axis Wind Turbin (VAWT) which has the compact construction is now becoming an interesting research object to develop in order to meet the electrical energy demand. But, the operation of VAWT in Indonesia would be a challenge due to the wind character that changing in wind direction, and the fluctuation of the wind speed in the major cities is also need to be considered. Those challenges are now becoming something that need to be achieved in order to realize an optimum design of VAWT in Indonesia.

A numerical simulation were conducted to investigate the 3D flow phenomenon of a rotating VAWT using the software called STAR CCM+ 9.02.007-R8. The Wind Turbine which used is a Savonius S-type blade with 2 blades with various stage number (1, 2 and 3). The wind speed which used are 5, 10 dan 15 m/s. The simulation was conducted as an unsteady, incompressible flow, k-omega Shear-Stress Transport (SST) is chosen as turbulence model. The rotating rotor was set to be a rotation wall with various rotational speed based on the wind speed.

The result are the comparison between 2D results and 3D result with the analysis of performance comparison and flow phenomenon using a Single Staged turbine. Moreover, a

qualitative result comparison in the contour is also presented. Furthermore, a quantitative data about the performance of torque and Power coefficient from those three VAWT model were compared. The best performance of VAWT was showed by Dual Staged rotor at 0,39 TSR with the Power Coefficient of 0,102.

Keywords: Savoius Wind Turbine, Stage, Torque, Power Coefficient (CP), Tip Speed Ratio (TSR).

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji bagi Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan petunjuknya akhirnya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul: **Investigasi Numerik Turbin Angin Savonius Dengan Variasi Jumlah Stage dan Kecepatan Angin**. Penulis ingin berterima kasih kepada orang-orang di sekitar penulis yang ikut terlibat dalam penulisan tugas akhir ini. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua terutama Ibu Sri Sunarti, sosok seorang Ibu yang selalu menyayangi dan mendoakan penulis pagi dan malam. Terima kasih sebanyak-banyaknya untuk mama tersayang.
2. Mbak Desy, kita wisuda bareng. Mbak Tiara dan Bang Sakti, aku akhirnya lulus nih. Aisyah Nasution, cinta-cinta odudut yang selalu dirindukan. Terima kasih atas dukungan kalian baik secara moril maupun materil yang tiada henti selama ini.
3. Bu Vivien Suphandani, ST., ME., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir ini. Terima kasih untuk waktu, kritik dan saran serta motivasinya hingga terselesaikan tugas akhir ini.
4. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA., Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D, Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT., dan Dr. Bb. Arip Dwiyanoro, ST., M.Eng., selaku dosen penguji yang telah memberikan komentar dan masukannya demi hasil tugas akhir penulis yang lebih baik.
5. Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin ITS, khususnya Dosen dan Karyawan Laboratorium Mekanika Fluida yang selalu memberi motivasi kepada penulis untuk segera menyelesaikan pengerjaan tugas akhir.
6. Penghuni Laboratorium Mekanika Fluida Teknik Mesin ITS: “God of Mcfly” Copet yang setia dan Ayoeb kapan lulusnya, Kurir B4DR, Ululul penunggu ruang sebelah, Wandahamida

provider printer, Dimz arek strike, Tsabitiz “HOPE” DotA 2, Adekasa yang mengayomi anak sak lab. Kalian selalu memberikan tawa dan mengisi cerita sehari-hari, jalan-jalan *refreshing* dan bakar-bakar malam hari selama sisa waktu kuliah penulis.

7. Obel dan Dante, sobat seperjuangan tugas akhir terima kasih sudah selalu setia menunggu, menemani, mendukung dan membantu selama pengerjaan Tugas Akhir.
8. Republik Kentang Mekflu: Paduka Gopet, Mas Putra, Raja Kentang aDimasP dan rakyat kentang jelata lainnya terima kasih atas cerita humor, motivasi, bimbingan dan bantuannya selama perkuliahan.
9. Seluruh *squad* “Bengs” LBMM-2012, khususnya divisi R2 kita gaspoll.
10. Teman-teman M55 terima kasih telah menemani perjuangan selama perkuliahan. Tetep jadi angkatan yang sangar ya rek!
11. Semua teman-teman SMRM, aku isok lulus iki kon mesti isok rek.
12. Dek “An” yang tiba-tiba dateng nonton seminarku padahal ada kelas kuliah perpan dan seringkali ngasih tulisan “mangat qq” lewat sosmed, Chat mu hiburanku selama TA meskipun jarang-jarang. Akhirnya aku rapotan juga lho!

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan tugas akhir kedepannya. Akhir kata penulis berharap agar tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi semua.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
Abstrak	vii
<i>Abstract</i>	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	3
1.3. TUJUAN PENELITIAN	4
1.4. BATASAN MASALAH.....	5
BAB II.....	7
2.1. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1.1. Dias (2016).....	7
2.1.2. Frikha et al (2016).....	13
2.1.3. Dwiyanoro et al (2015)	21
2.1.4. Akwa et al (2012).....	24
2.1.5. Saha et al (2008).....	30
2.2. DASAR TEORI.....	34
2.2.1. Energi Angin.	34
2.2.2. Aerodinamika Vertical Axis Wind Turbine (VAWT).	37
2.2.3. Turbin Angin Savonius.	40
2.2.4. Model Turbulensi	42
BAB III.....	45
3.1. VARIASI DAN DOMAIN SIMULASI.....	45

3.1.1.	Variasi	45
3.1.2.	Domain Simulasi	45
3.2.	TAHAP PRE-PROCESSING	46
3.2.1.	Pembuatan Geometri dan Meshing	46
3.2.2.	Pengaturan <i>Boundary Condition</i>	50
3.2.3.	Parameter Simulasi.....	51
3.3.	TAHAP PROCESSING	52
3.4.	TAHAP POST PROCESSING.....	53
3.5.	DIAGRAM ALIR PENELITIAN	54
BAB IV	57
4.1	SETTING PERMODELAN SIMULASI	57
4.2	JUSTIFIKASI PARAMETER DAN HASIL	58
4.2.1	<i>Grid Independency Test</i>	58
4.2.2	Validasi Kondisi Operasi pada Simulasi	58
4.2.3	Validasi Parameter Permodelan Simulasi	59
4.3	PERBANDINGAN HASIL SIMULASI 2D DAN 3D	61
4.3.1	<i>End Wall Effect</i> pada Simulasi Aliran 3D	61
4.3.2	Perbandingan Performa Turbin	64
4.4	KONFIGURASI MULTISTAGE.....	67
4.4.1	Konfigurasi <i>Dual Stage</i>	67
4.4.2	Konfigurasi <i>Triple Stage</i>	71
4.4.3	Perbandingan Variasi <i>Stage</i>	76
BAB V	83
5.1	KESIMPULAN	83
5.2	REKOMENDASI	83
DAFTAR PUSTAKA	85
RIWAYAT PENULIS	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Dimensi turbin angin Savonius dua sudu (Dias, 2016).....	7
Gambar 2. 2 Dimensi turbin angin Savonius tiga sudu (Dias, 2016).....	8
Gambar 2. 3 Boundary condition turbin angin Savonius dengan 2 sudu (Dias, 2016).....	9
Gambar 2. 4 Boundary condition turbin angin Savonius dengan 3 sudu (Dias, 2016).....	9
Gambar 2. 5 Perbesaran gambar meshing turbin angin Savonius (a) dua sudu, (b) tiga sudu (Dias, 2016).	10
Gambar 2. 6 Kontur kecepatan aliran melewati turbin angin Savonius pada sudut $\theta = 90^\circ$ (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Dias, 2016).....	11
Gambar 2. 7 Kontur tekanan aliran melewati turbin angin Savonius pada sudut $\theta = 90^\circ$ (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Dias, 2016).....	11
Gambar 2. 8 Grafik torsi terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius (Dias, 2016).	12
Gambar 2. 9 Grafik koefisien daya terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius (Dias, 2016).....	12
Gambar 2. 10 Rotor Savonius penelitian (Frikha et al, 2016).	13
Gambar 2. 11 Geometri rotor Savonius (Frikha et al, 2016).	14
Gambar 2. 12 Model simulasi (a) boundary condition dan (b) setting putaran rotor 52 rad/s (Frikha et al, 2016).	15
Gambar 2. 13 Meshing Simulasi Numerik (a) Tampak keseluruhan (b) Plane section $x=0$ dan (c) Plane section $y=0$ (Frikha et al, 2016).	16

Gambar 2. 14 Kontur kecepatan pada simulasi numerik (a) Plane section $x=0$ dan (b) Plane section $y=0$ (Frikha et al, 2016).....	17
Gambar 2. 15 Kontur Tekanan statis dari simulasi numerik (a) Plane section $x=0$ dan (b) Plane section $y=0$ (Frikha et al, 2016).....	18
Gambar 2. 16 Kontur Vorticity pada simulasi numerik (a) Plane section $x=0$ dan (b) Plane section $y=0$ (Frikha et al, 2016).....	19
Gambar 2. 17 Profil kecepatan simulasi numerik dan eksperimen (a) $z = +150$ mm dan (b) $z = -150$ mm (Frikha et al, 2016).....	20
Gambar 2. 18 Kurva Perbandingan Torsi Dinamis yang dihasilkan rotor Savonius pada variasi stage (Frikha et al, 2016).....	20
Gambar 2. 19 Kurva Perbandingan Koefisien Daya yang dihasilkan rotor Savonius pada variasi stage (Frikha et al, 2016).....	21
Gambar 2. 20 Layout turbin angin Darrieus-Savonius (Dwiyantoro et al, 2015)	22
Gambar 2. 21 Grafik kecepatan angin terhadap putaran turbin angin (Dwiyantoro et al, 2015).....	23
Gambar 2. 22 Grafik koefisien daya turbin angin terhadap TSR (Dwiyantoro et al, 2015).....	23
Gambar 2. 23 Kurva pengaruh adanya Endplate dari penelitian Ushiyama et al (1988) (Akwa et al, 2012).	25
Gambar 2. 24 Kurva pengaruh nilai aspect ratio pada rotor hasil penelitian Vance et al (1978) (Akwa et al, 2012).	26
Gambar 2. 25 Kurva pengaruh jumlah sudu terhadap moment angular rotor (Akwa et al, 2012).	27

Gambar 2. 26 Kurva pengaruh jumlah stage terhadap koefisien daya rotor hasil penelitian Saha et al (2008) dan Hayashi et al (2005) (Akwa et al, 2012).	27
Gambar 2. 27 Kurva Penjumlahan Momen Angular Rotor (Akwa et al, 2010).	28
Gambar 2. 28 Kurva moment koefisien pada berbagai nilai Re (Akwa et al, 2010).	29
Gambar 2. 29 Kurva Performa koefisien daya rotor terhadap turbulent intensity pada $Re=867000$ (Akwa et al, 2010). ..	29
Gambar 2. 30 Geometri turbin angin Savonius variasi sudu (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Saha et al, 2008)	30
Gambar 2. 31 Geometri turbin angin Savonius variasi stage (Saha et al, 2008)	30
Gambar 2. 32 Geometri sudu (semicircular dan twisted) (Saha et al, 2008)	31
Gambar 2. 33 Low speed wind tunnel (Saha et al, 2008) ..	32
Gambar 2. 34 Koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan sudu semicircular dengan variasi jumlah sudu dan tingkat (Saha et al, 2008)	33
Gambar 2. 35 Koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan sudu twisted dengan variasi jumlah sudu dan tingkat (Saha et al, 2008)	33
Gambar 2. 36 Koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan dua sudu dengan variasi geometri sudu dan jumlah tingkat (Saha et al, 2008)	34
Gambar 2. 37 Varian turbin angin sumbu vertikal.	38
Gambar 2. 38 Turbin angin Savonius.	41
Gambar 2. 39 Jenis blade turbin angin Savonius tipe barrel dan S	41
Gambar 2. 40 Modifikasi blade Savonius: a) Blade helical b) Blade twisted	41

Gambar 3. 1 Turbin Angin Savonius dua sudu dan satu stage.....	47
Gambar 3. 2 Turbin Angin Savonius dua sudu dan dua stage.....	47
Gambar 3. 3 Turbin Angin Savonius dua sudu dan tiga stage.....	47
Gambar 3. 4 Meshing volume yang dibuat pada seluruh domain.....	48
Gambar 3. 5 Meshing tiga dimensi pada Turbin Angin Savonius satu stage.....	49
Gambar 3. 6 Meshing tiga dimensi pada Turbin Angin Savonius dua stage.	49
Gambar 3. 7 Meshing tiga dimensi pada Turbin Angin Savonius tiga stage.	50
Gambar 3. 8 Boundary Condition pada permodelan simulasi.....	51
Gambar 3. 9 Flowchart Penelitian Umum.....	54
Gambar 3. 10 Flowchart Simulasi.....	56
Gambar 4. 1. Kurva Perubahan Nilai pada Grid Independency Test.....	58
Gambar 4. 2. Testing Parameter Putaran Turbin pada $V = 10$ m/s.	59
Gambar 4. 3. Testing Parameter Turbulence Modeling pada Turbin.....	61
Gambar 4. 4. Perbandingan Hasil Kontur Kecepatan pada Simulasi Turbin Angin Savonius pada $V = 15$ m/s konstruksi Single Stage.	62
Gambar 4. 5. Streamline Aliran Fluida Diambil pada $y = 0,45h$, $y = 0,25h$ dan $y = 0$ (mid-span) Saat Sudu Berputar 90°	63

Gambar 4. 6. Perbandingan Nilai Koefisien daya terhadap Putaran pada Simulasi 2D dan 3D pada variasi Kecepatan Angin 15 m/s.	65
Gambar 4. 7. Perbandingan Nilai Koefisien Daya terhadap Variasi Kecepatan Angin pada Simulasi 2D dan 3D.	66
Gambar 4. 8. Kontur Kecepatan Aliran Melewati Turbin Angin Savonius Dual Stage pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.	67
Gambar 4. 9. Kontur Tekanan Statis Aliran Melewati Turbin Angin Savonius Dual Stage pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.	68
Gambar 4. 10. Siklus Torsi Turbin Angin Savonius Dual Stage pada berbagai Kecepatan Angin 15 m/s.	70
Gambar 4. 11. Kurva Nilai Koefisien Daya terhadap Tip Speed Ratio pada Turbin Angin Savonius Dual Stage.	71
Gambar 4. 12. Kontur Kecepatan Aliran Melewati Turbin Angin Savonius Triple Stage pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.	72
Gambar 4. 13. Kontur Tekanan Aliran Melewati Turbin Angin Savonius Triple Stage pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.	73
Gambar 4. 14. Siklus Torsi Turbin Angin Savonius Triple Stage pada berbagai Kecepatan Angin 15 m/s.	74
Gambar 4. 15. Kurva Nilai Koefisien Daya terhadap Tip Speed Ratio pada Turbin Angin Savonius Triple Stage.	75
Gambar 4. 16. Perbandingan streamline aliran pada variasi Turbin Angin Savonius Single Stage, Dual Stage dan Triple Stage.	77
Gambar 4. 17 Perbandingan nilai Torsi rata-rata pada variasi Turbin Angin Savonius Single Stage, Dual Stage dan Triple Stage.	78

Gambar 4. 18. Perbandingan nilai Torsi rata-rata pada variasi Turbin Angin Savonius Single Stage, Dual Stage dan Triple Stage.	79
Gambar 4. 19. Perbandingan nilai Koefisien Daya pada variasi Turbin Angin Savonius Single Stage, Dual Stage dan Triple Stage.	80

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tingkatan kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah (World Wind Energi Association, 2007)	36
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian	45
Tabel 4. 1. Input Data dan Time Step Setiap Kecepatan Angin.	57
Tabel 4. 2. Justifikasi pemilihan Turbulence Modeling.....	60
Tabel 4. 3. Perbandingan hasil simulasi 2D dan 3D.	64
Tabel 4. 4. Hasil Torsi dari Turbin Angin Savonius Dual Stage.	69
Tabel 4. 5. Hasil Torsi dari Turbin Angin Savonius Triple Stage.	75

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Dewasa ini kebutuhan akan energi sudah terkesan menjadi sebuah kebutuhan pokok bagi kehidupan manusia. Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat semakin berkembangnya teknologi sarana dan prasarana penunjang aktivitas dimana manusia berada maka kebutuhan akan energi pun akan semakin besar, khususnya dalam hal ini adalah energi listrik. Sumber energi listrik terbesar yang diketahui dan dikembangkan di Indonesia sampai saat ini adalah dari pembangkit-pembangkit tenaga listrik yang tersebar di beberapa daerah di Indonesia. Bila dikaji lebih dalam mengenai pembangkit-pembangkit tersebut, kita akan menemui masih banyaknya unit pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energinya, misalnya batu bara, BBM (solar) maupun gas alam. Sementara itu bahan bakar fosil merupakan jenis sumber energi tidak terbarukan yang akan habis bila digunakan terus menerus. Maka dari itu diperlukan sebuah solusi alternatif penyedia sumber energi listrik yang sifatnya sebagai energi baru-terbarukan sehingga dapat menyediakan energi listrik yang berkelanjutan.

Di wilayah Indonesia, sumber energi baru-terbarukan yang dapat digunakan sebagai alternatif pembangkitan daya listrik contohnya adalah angin. Energi dari hembusan angin dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan sebuah turbin angin, sehingga dari turbin angin tersebut akan dihasilkan energi listrik yang dapat dimanfaatkan dalam skala kecil maupun besar yang



bergantung pada ukuran turbin angin tersebut. Di berbagai negara maju, turbin angin digunakan untuk membantu memenuhi kebutuhan listrik dalam skala nasional, sedangkan untuk skala kecil contohnya adalah sebagai sumber energi listrik untuk lampu penerangan jalan. Salah satu tempat yang cocok untuk penempatan turbin angin tersebut yakni di Jembatan Suramadu yang menghubungkan Kota Surabaya dan Pulau Madura. Tempat tersebut dinilai cukup strategis karena terbuka dan memiliki kondisi angin yang cukup baik dengan kecepatan rata-rata angin 5 m/s sampai 7,5 m/s. Di tempat tersebut bisa diinstalasi turbin angin tipe savonius yang memiliki keunggulan mampu menerima angin dari segala arah. Kelebihan tersebut cocok dengan kondisi arah angin di wilayah Indonesia yang sering berubah-ubah, hal tersebut dikarenakan secara letak geografis wilayah Indonesia merupakan daerah pertemuan angin.

Berbagai penelitian mengenai turbin savonius telah dilakukan, diantaranya Saha et al (2008) melakukan uji eksperimen untuk menguji performa rotor turbin angin Savonius dengan berbasis pada jumlah tingkat, jumlah sudu, dan geometri sudu. Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Akwa et al (2012) menyajikan sebuah review mengenai performa dari Turbin Angin Savonius dengan range koefisien daya rata-rata sebesar 0,05-0,30. Lalu performa rotor yang dihasilkan hingga 50% dari TSR untuk performa koefisien daya yang dihasilkan rotor yang bertujuan secara umum adalah untuk memberikan informasi umum mengenai Turbin Angin khususnya tipe Savonius dan menyajikan ulasan mengenai performa yang dihasilkannya. Penelitian Akwa et al (2012) menjadi sebuah informasi dan literatur referensi yang fundamental karena dari artikel yang



dipublikasikannya tersebut terdapat bermacam-macam aspek yang memang menjadi focus studi maupun penelitian dari berbagai kalangan di berbagai tempat pula.

Kemudian Dwiyanoro (2015) yang meneliti secara eksperimental mengenai karakteristik performa turbin angin sumbu vertikal jenis Darrieus-Savonius yang dapat menghasilkan peningkatan torsi dan daya bangkitan seiring dengan kenaikan kecepatan angin. Lalu Dias (2016). Beliau meneliti tentang optimasi performa torsi dan koefisien daya yang dihasilkan dari turbin savonius variasi 2 sudu dan 3 sudu pada berbagai kecepatan angin yang berbeda. Selain itu penelitian oleh Frikha (2016) yang dilakukan secara simulasi numerik dan eksperimen dilakukan untuk mempelajari pengaruh bentuk *multi-stage* pada performa rotor Savonius. Penelitian secara eksperimen yang dilakukan ini menggunakan rotor savonius dengan jumlah *stage* satu sampai lima.

Dari penelitian-penelitian tersebut, penulis hendak meneliti secara simulasi tiga dimensi tentang performa turbin angin savonius yang berukuran sama namun diberikan variasi jumlah *stage* pada berbagai kondisi kecepatan angin untuk kasus di wilayah Sembatan Suramadu yang telah disebutkan di atas.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Penelitian tentang medan aliran yang melewati sebuah turbin angin yang berputar pada suatu kondisi angin tertentu baik secara eksperimental maupun simulasi numerik telah banyak dilakukan. Secara eksperimen menggunakan *wind tunnel* penelitian mengenai turbin angin belum mencakup kondisi adanya perubahan arah maupun karakter profil aliran yang kurang stabil, karena pada saat



menggunakan *wind tunnel* profil aliran datang cenderung berkarakter *uniform* akibat adanya profil *honeycomb* pada bagian *inlet wind tunnel*. *Honeycomb effect* sendiri menghasilkan drag dengan nilai bervariasi bergantung dari karakter bentuk lubang apakah hexagonal, persegi atau lingkaran. Selain itu ada beberapa faktor lain yang sangat berpengaruh terhadap hasil eksperimennya yakni *blockage ratio* pada aliran di daerah *test section*. *Blockage ratio* yang terlalu besar ($>10\%$) akan membuat hasil yang telah didapatkan menjadi kurang baik, maka dari itu hal ini perlu diperhatikan dalam melakukan eksperimen dengan *wind tunnel*.

Untuk itu pada penelitian simulasi numerik akan dilakukan pembuatan model *geometry* yang dapat memenuhi kekurangan di atas. Dalam penelitian secara simulasi numerik ini akan digunakan pendekatan kondisi aliran angin lewat pengkondisian simulasi pada intensitas turbulensi dan pengaturan *geometry* serta kondisi batas untuk menghindari efek *blockage ratio* $>10\%$.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan investigasi secara tiga dimensi pada aliran fluida yang melewati sebuah Turbin Angin Savonius yang berputar pada kecepatan putaran tertentu. Data kualitatif berupa kontur kecepatan dan tekanan akan diamati dan dievaluasi fenomena yang terjadi selama turbin berputar. Pada penelitian ini, model turbulensi *k-omega Shear-Stress Transport* (SST) digunakan untuk mendapatkan data-data kuantitatif berupa *Coefficient of Performance* (C_p) fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR) pada variasi nilai kecepatan angin dan kecepatan putar turbin angin sesuai dengan referensi



penelitian terdahulu. Selain itu dari penelitian ini juga diharapkan adanya pemilihan *optimal stage* yang dapat diinstalasikan untuk kondisi yang sesuai dengan uraian pada latar belakang di atas.

1.4. BATASAN MASALAH

Agar permasalahan dalam penelitian ini menjadi lebih spesifik, maka peneliti mengambil beberapa batasan hanya pada hal berikut ini:

1. *Software* yang digunakan untuk simulasi adalah STAR-CCM+ 9.02.007-R8.
2. Studi numerik ini dilakukan secara tiga dimensi (3D) pada rotor turbin angin Savonius.
3. *Unsteady incompressible flow*.
4. Putaran turbin disimulasikan sebagai *rotating motion*.
5. Arah aliran angin dianggap hanya searah dari *inlet* menuju *outlet*.
6. Aspek meteorologi dan kondisi lingkungan lainnya diabaikan.
7. Analisis bahan dari turbin angin tidak disertakan dalam studi numerik ini.
8. Pengaruh dari getaran rotor turbin angin yang berputar diabaikan.
9. Keberadaan penyangga dari rotor turbin angin tidak diikutsertakan dalam studi numerik ini.
10. *Ground effect* diabaikan.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



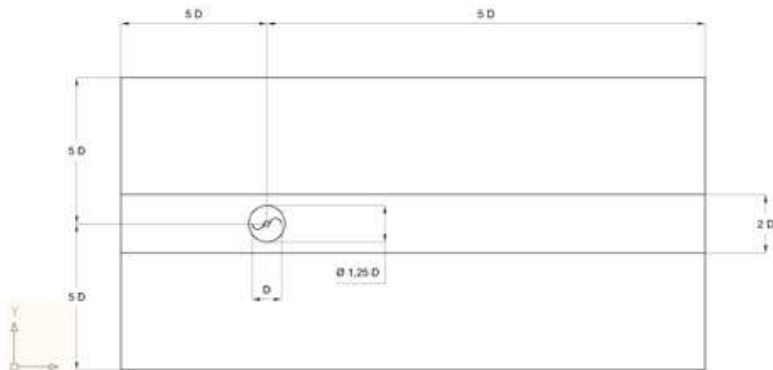
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

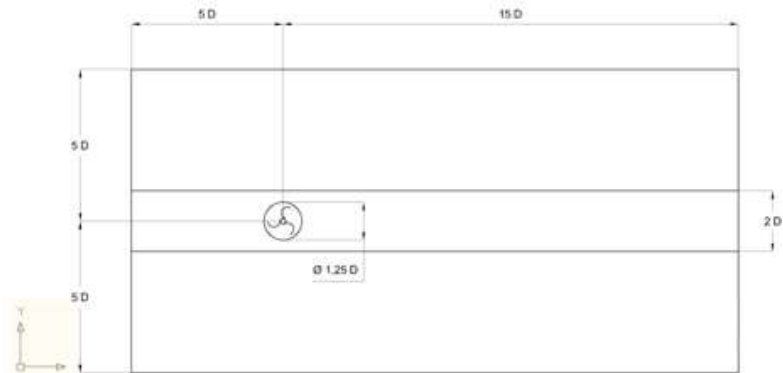
2.1. TINJAUAN PUSTAKA

2.1.1. Dias (2016)

Dias (2016) melakukan sebuah penelitian dengan metode simulasi numerik secara dua dimensi untuk menguji performa turbin angin savonius yang berbasis pada jumlah sudu sebanyak dua sudu dan tiga sudu terhadap perubahan kecepatan angin datang. Gambar 2.1 dan 2.2 menunjukkan geometri yang dibuat pada penelitian tersebut.



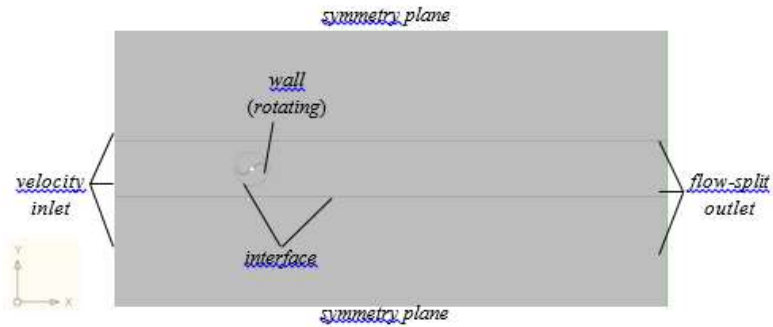
Gambar 2. 1 Dimensi turbin angin Savonius dua sudu (Dias, 2016).



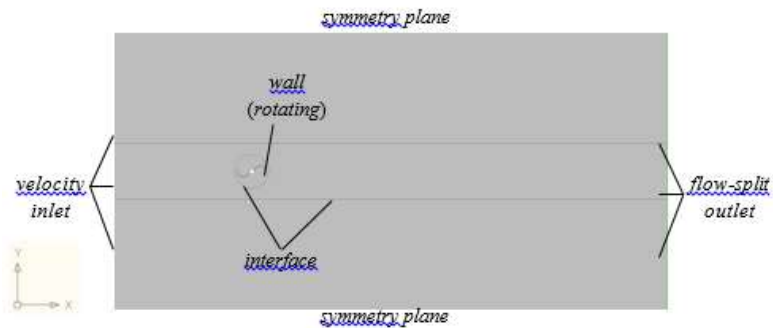
Gambar 2. 2 Dimensi turbin angin Savonius tiga sudu (Dias, 2016).

Tujuan dari simulasi numerik ini yaitu membandingkan kontur aliran udara yang melewati rotor savonius yang berputar, membandingkan performa dari rotor savonius yang menggunakan dua sudu dan tiga sudu. Lalu membandingkan torsi dan koefisien daya yang dihasilkan dari kedua rotor tersebut.

Simulasi ini dilakukan secara dua dimensi dengan permodelan aliran secara *Implicit Unsteady*. Permodelan turbulensi aliran yang dipilih yakni k-epsilon *realizable* dengan metode perhitungan secara *segregated flow* pada skema diskritisasi *second order upwind*. Lalu untuk rotor savonius ditetapkan sebagai *rotation motion* untuk memodelkan sebagai turbin angin yang berputar. *Boundary condition* pada *inlet* yaitu *velocity inlet* memiliki nilai 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* digunakan *flow-split outlet*. Pada titik temu antara dua *domain* dianalisis sebagai *interface*. Gambar 2.3 dan 2.4 menunjukkan skema penentuan *boundary condition*.

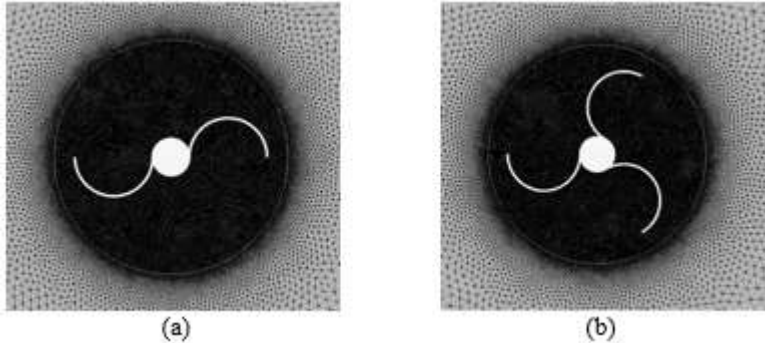


Gambar 2. 3 Boundary condition turbin angin Savonius dengan 2 sudu (Dias, 2016).



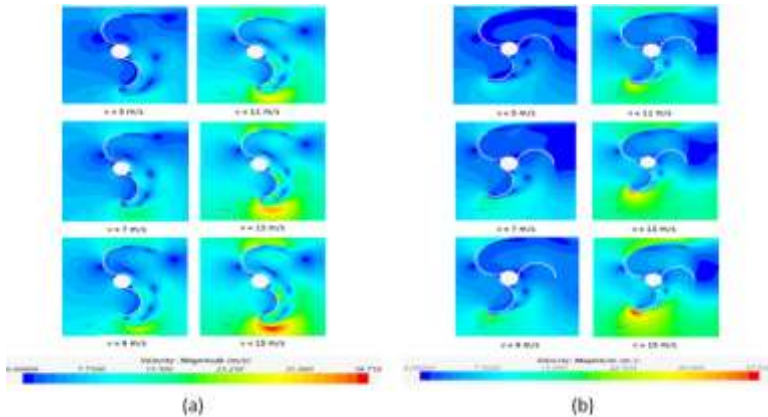
Gambar 2. 4 Boundary condition turbin angin Savonius dengan 3 sudu (Dias, 2016).

Sedangkan pembuatan *meshing* dilakukan secara otomatis dan menggunakan bentuk *mesh tetrahedral* seperti terlihat pada gambar 2.5.

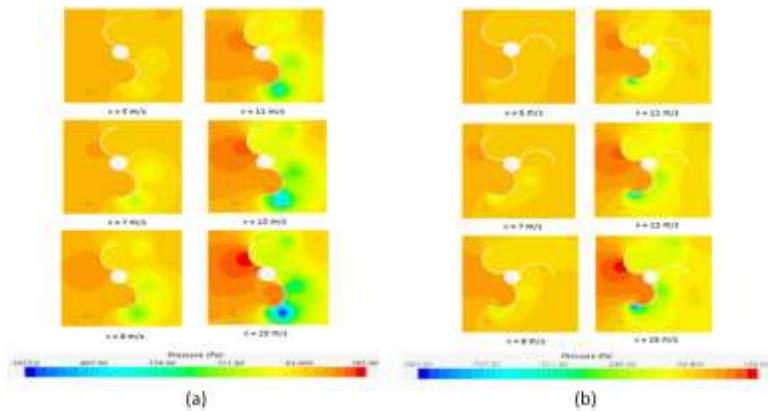


Gambar 2. 5 Perbesaran gambar meshing turbin angin Savonius
(a) dua sudu, (b) tiga sudu (Dias, 2016).

Hasil yang didapatkan dari simulasi tersebut dapat dikategorikan dalam dua bentuk, yakni secara kualitatif dan kuantitatif. Hasil kualitatif berupa kontur kecepatan aliran angin dan kontur tekanan fluida sepanjang aliran melewati rotor yang berputar. Pada gambar 2.6 dan 2.7 terlihat kontur kecepatan dan tekanan pada aliran fluida udara yang melewati rotor. Dari gambar tersebut terlihat penambahan sudu menyebabkan penurunan kecepatan yang dapat dicapai oleh aliran angin saat turbin berputar. Hal tersebut mengindikasikan adanya penambahan luasan drag akibat adanya sudu ketiga. Jadi dalam hal ini hasil yang lebih baik adalah turbin dengan dua sudu.



Gambar 2. 6 Kontur kecepatan aliran melewati turbin angin Savonius pada sudut $\theta = 90^\circ$ (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Dias, 2016).

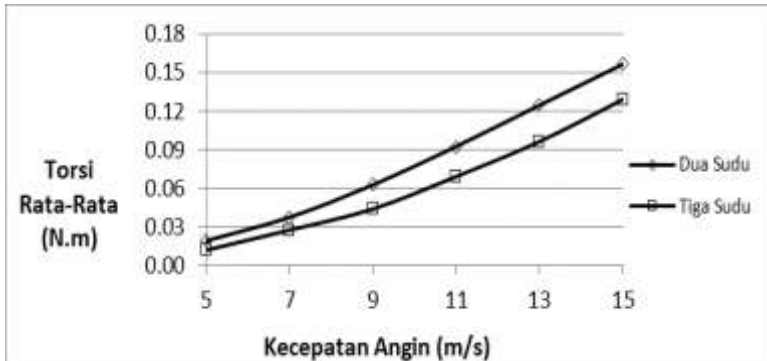


Gambar 2. 7 Kontur tekanan aliran melewati turbin angin Savonius pada sudut $\theta = 90^\circ$ (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Dias, 2016).

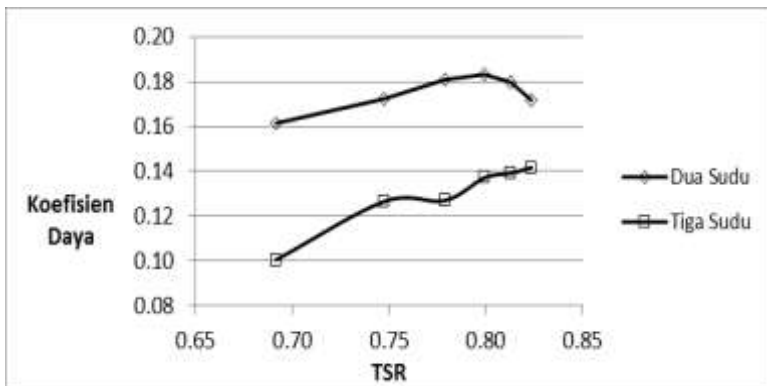
Hasil kuantitatif yang didapat dari simulasi tersebut yakni disajikan dalam kurva hubungan antara torsi rata-rata yang



dihasilkan oleh putaran rotor fungsi kecepatan angin, selain itu kurva hubungan koefisien daya fungsi TSR juga diberikan.



Gambar 2. 8 Grafik torsi terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius (Dias, 2016).



Gambar 2. 9 Grafik koefisien daya terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius (Dias, 2016).

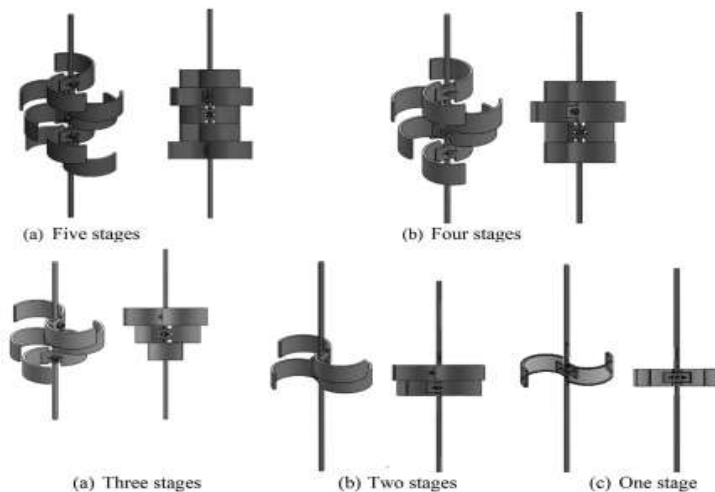
Dari simulasi numerik ini didapatkan hasil bahwa rotor dengan dua sudu menghasilkan torsi rata-rata yang



lebih baik. Hal ini dikarenakan semakin banyak sudu, maka semakin besar permukaan *drag* yang melawan aliran angin dan mengakibatkan penurunan koefisien daya yang bekerja pada sudu turbin angin Savonius. Namun, turbin angin Savonius tiga sudu menghasilkan *uniformity* torsi yang lebih baik daripada turbin angin Savonius dua sudu.

2.1.2. Frikha et al (2016)

Frikha (2016) dalam penelitian yang dilakukan secara simulasi numerik dan experiment dilakukan untuk mempelajari pengaruh bentuk *multi-stage* pada performa rotor Savonius. Penelitian secara eksperimen yang dilakukan ini menggunakan rotor savonius dengan jumlah *stage* satu sampai lima. Specimen yang digunakan pada penelitian eksperimen Frikha (2016) adalah seperti pada gambar 2.10. Geometri dari uji eksperimen dibuat dengan dimensi seperti gambar 2.11.



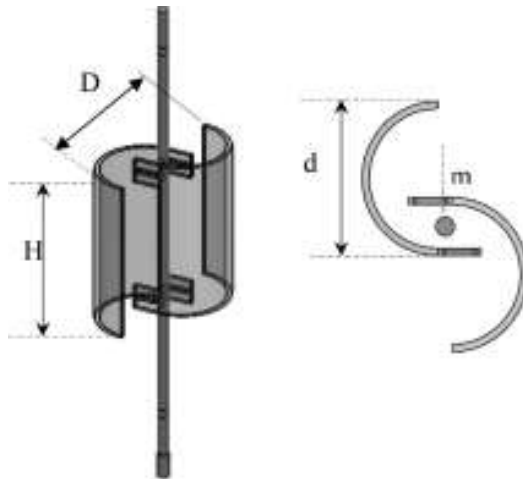
Gambar 2. 10 Rotor Savonius penelitian (Frikha et al, 2016).



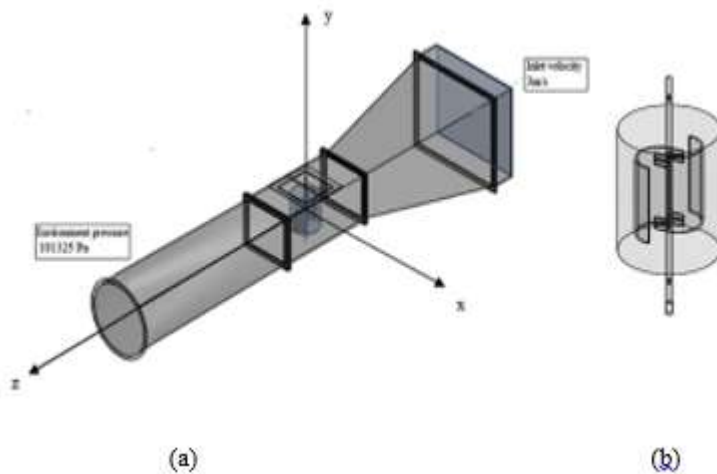
Sedangkan simulasi numerik yang dilakukan oleh Frikha et al (2016) dilakukan dengan bantuan software SOLIDWORKS FLOW SIMULATION untuk melihat karakteristik maupun kontur dari kecepatan, tekanan dinamis, vorticity dan turbulent kinetic energi pada masing-masing model. Meshing pada simulasi ini terlihat seperti gambar 2.13. sedangkan pengaturan domain simulasi dibuat seperti gambar 2.12.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari dan membandingkan perilaku aliran dan performa rotor Savonius yang dibuat dari berbagai *stage*. Hasil dari studi numerik akan digunakan untuk melihat profil kecepatan, torsi dynamic yang dihasilkan rotor dan koefisien daya. Sedangkan hasil dari eksperimen digunakan sebagai validasi.

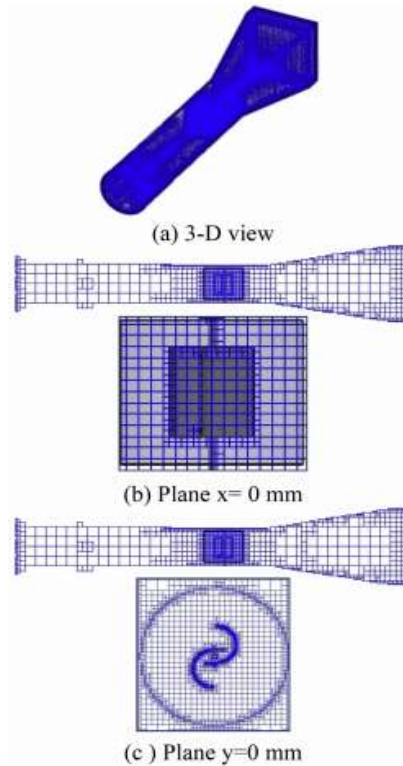
Penelitian ini dilakukan menggunakan ukuran rotor Savonius dengan panjang blade sebesar $H = 200$ mm dan Diameter $D = 173$ mm.



Gambar 2. 11 Geometri rotor Savonius (Frikha et al, 2016).

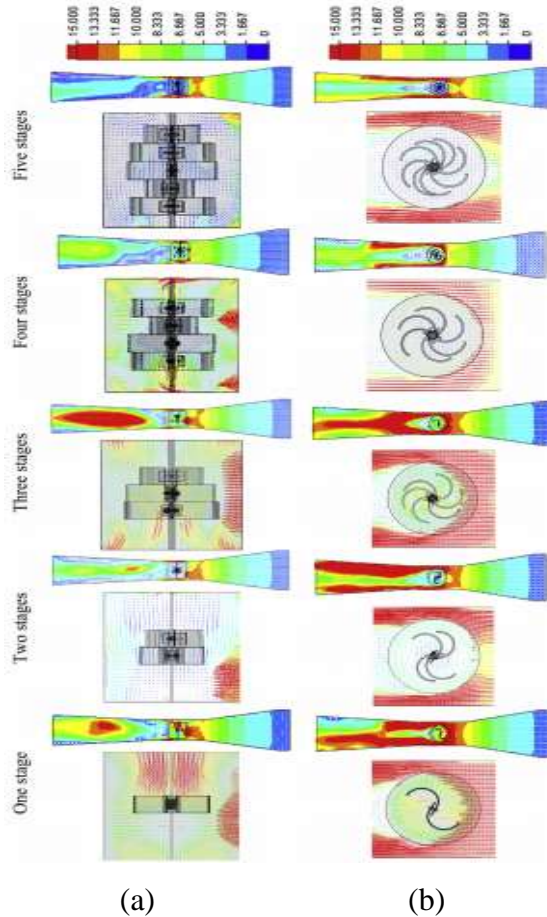


Gambar 2. 12 Model simulasi (a) boundary condition dan (b) setting putaran rotor 52 rad/s (Frikha et al, 2016).



Gambar 2. 13 Meshing Simulasi Numerik (a) Tampak keseluruhan (b) *Plane section* $x=0$ dan (c) *Plane section* $y=0$ (Frikha et al, 2016).

Simulasi numerik yang dilakukan oleh Frikha et al (2016) menghasilkan kontur kecepatan, tekanan dan vorticity yang terjadi seperti gambar 2.14, 2.15 dan 2.16.

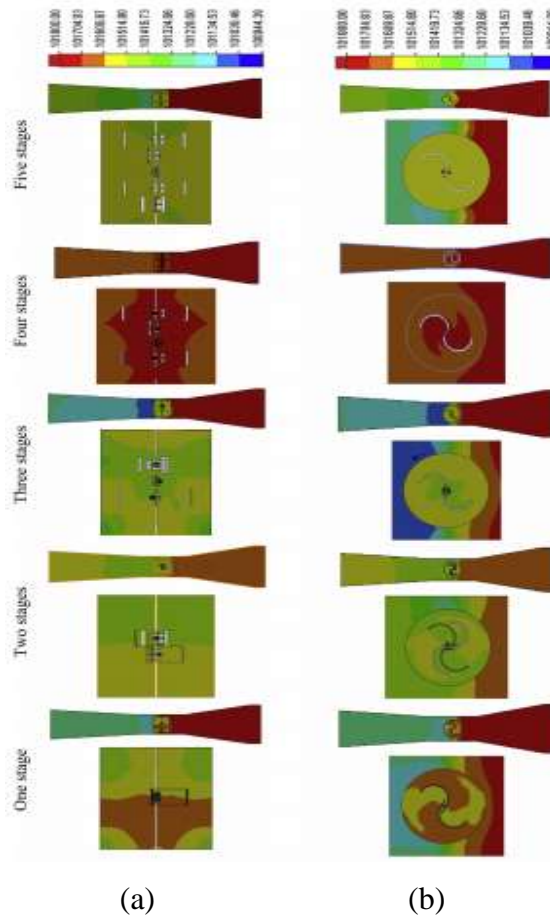


Gambar 2. 14 Kontur kecepatan pada simulasi numerik (a) *Plane section* $x=0$ dan (b) *Plane section* $y=0$ (Frikha et al, 2016).

Kontur kecepatan dari hasil simulasi tersebut menunjukkan kecepatan aliran angin yang besarnya berbeda-beda pada daerah *test section*. Kecepatan aliran maksimum dicapai pada model dengan variasi satu, tiga dan empat *stage*.



Sedangkan kecepatan terendah terjadi pada model dengan variasi lima *stage*.

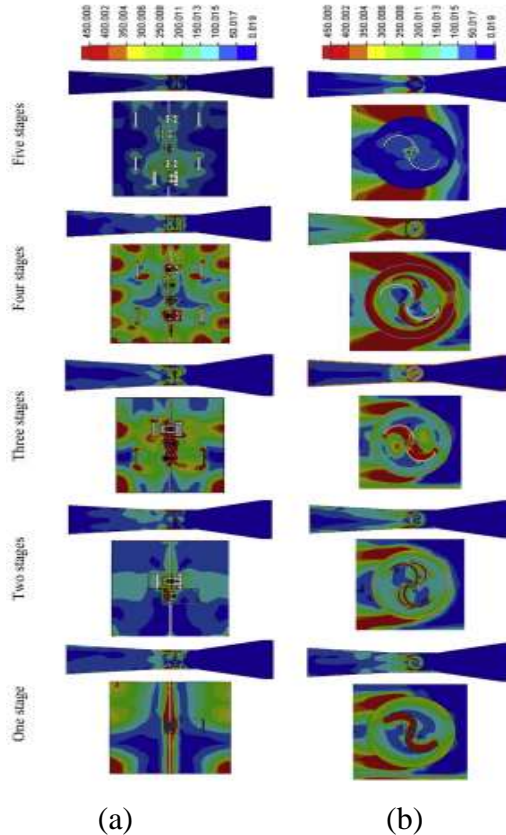


Gambar 2. 15 Kontur Tekanan statis dari simulasi numerik (a) *Plane section* $x=0$ dan (b) *Plane section* $y=0$ (Frikha et al, 2016).

Dari kontur tekanan statis di atas dapat dilihat bahwa adanya perbedaan tekanan pada sisi dalam dan luar sudu akan



menyebabkan rotor tersebut berputar. Bila diamati pada hasil simulasi ini, penurunan tekanan terbesar terjadi pada rotor dengan tiga *stage* sedangkan penurunan tekanan terkecil terjadi pada rotor dengan empat *stage*.



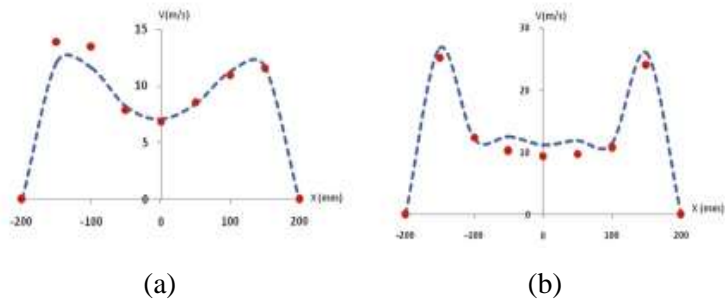
Gambar 2. 16 Kontur Vorticity pada simulasi numerik (a) *Plane section* $x=0$ dan (b) *Plane section* $y=0$ (Frikha et al, 2016).

Pada hasil kontur Vorticity pada simulasi di atas terlihat bahwa vorticity secara umum hanya terjadi di daerah *test*

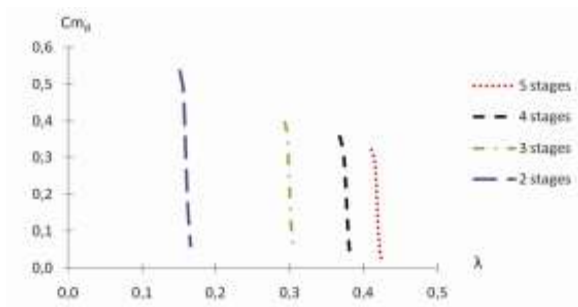


section. Vorticity terbesar terjadi di sekitar daerah sisi dalam dan luar sudu savonius. Nilai vorticity terendah yang tercatat yakni pada model dengan dua *stage* dan lima *stage*. Hal tersebut mengindikasikan minimnya daerah yang mengalami vorticity atau vortex.

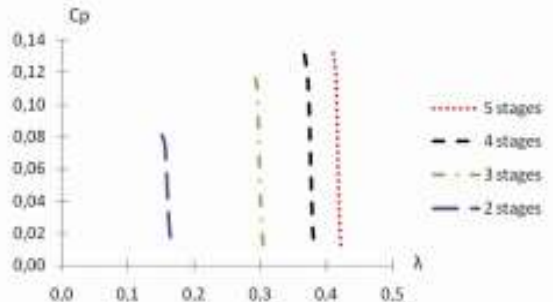
Selain hasil kualitatif di atas, penelitian Frikha et al (2016) juga menyajikan hasil kuantitatif berupa kurva profil kecepatan aliran angin, kurva torsi dinamis dan kurva koefisien daya pada masing-masing *stage* seperti gambar 2.17, 2.18 dan 2.19.



Gambar 2. 17 Profil kecepatan simulasi numerik dan eksperimen
(a) $z = +150$ mm dan (b) $z = -150$ mm (Frikha et al, 2016).



Gambar 2. 18 Kurva Perbandingan Torsi Dinamis yang dihasilkan rotor Savonius pada variasi *stage* (Frikha et al, 2016).

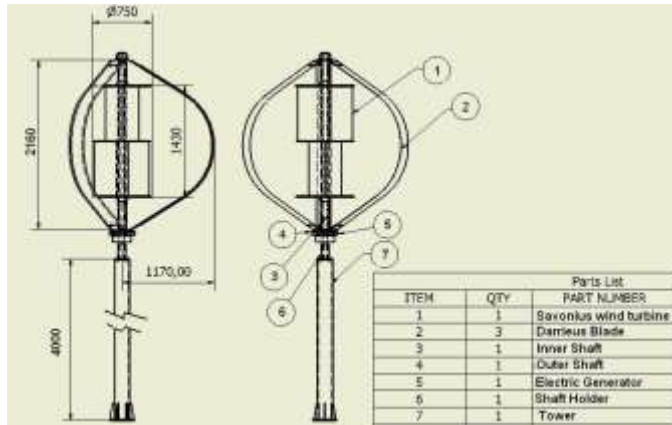


Gambar 2. 19 Kurva Perbandingan Koefisien Daya yang dihasilkan rotor Savonius pada variasi *stage* (Frikha et al, 2016).

Dari penelitian secara simulasi numerik maupun eksperimen yang telah dilakukan oleh Frikha et al (2016) menunjukkan hasil bahwa koefisien torsi dinamis dan koefisien daya akan naik seiring meningkatnya jumlah *stage* dari rotor Savonius tersebut. Dan hasil kualitatif yang didapat dari simulasi numerik sudah cukup sesuai dengan validasi secara eksperimen yang telah dilakukan.

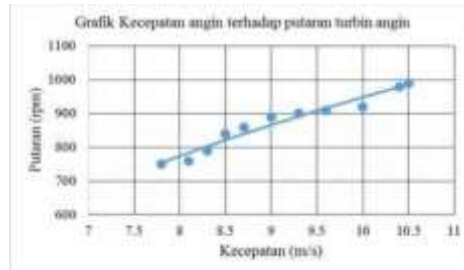
2.1.3. Dwiyantoro et al (2015)

Dwiyantoro et al (2015) melakukan studi eksperimen pada turbin angin Darrieus-Savonius. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius sehingga dapat diketahui desain optimal yang mampu menghasilkan daya.



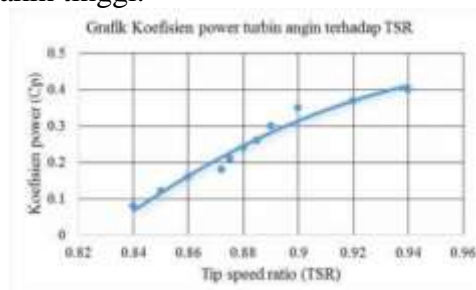
Gambar 2. 20 Layout turbin angin Darrieus-Savonius
(Dwiyantoro et al, 2015)

Gambar 2.20 menunjukkan *layout* turbin angin Darrieus-Savonius di mana dibuat dengan menggabungkan turbin angin Darrieus dan turbin angin Savonius pada satu poros yang sama dengan lokasi aksial yang sama, seolah-olah turbin angin Savonius berada di dalam turbin angin Darrieus. Kelebihan bentuk seperti ini adalah kemampuan mengekstrak daya yang relatif konsisten pada berbagai macam kondisi angin. Turbin angin Darrieus-Savonius ini memiliki tinggi 2,16 meter dan diameter 2,34 m. Turbin angin Darrieus memiliki 3 buah sudu berbentuk *airfoil* simetri dengan panjang *chord* 10 cm. Turbin angin Savonius memiliki konfigurasi 2 tingkat dan 2 sudu berbentuk setengah lingkaran. *Tower* memiliki ketinggian 4 m dari permukaan tanah dan diameter 14 cm dengan ketebalan 0,8 cm.



Gambar 2. 21 Grafik kecepatan angin terhadap putaran turbin angin (Dwiyantoro et al, 2015)

Gambar 2.21 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin dengan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin. Data dihasilkan pada saat turbin angin mulai menghasilkan daya, yaitu pada kecepatan angin di *wind tunnel* 7,5 m/s dengan putaran turbin 742 rpm. Grafik menunjukkan semakin besar kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin maka putaran yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini disebabkan energi yang dimiliki angin berbanding lurus dengan kecepatan angin yang terjadi, sehingga putaran yang terjadi semakin tinggi.



Gambar 2. 22 Grafik koefisien daya turbin angin terhadap TSR (Dwiyantoro et al, 2015)



Gambar 2.22 menunjukkan koefisien daya turbin angin meningkat seiring dengan meningkatnya TSR. Hal ini disebabkan karena TSR dipengaruhi oleh kecepatan angin yang mengenai sudu turbin angin, di mana semakin besar kecepatan angin maka TSR semakin besar pula. Turbin angin memiliki koefisien daya maksimum pada TSR 0,95 sebesar 42%.

Hasil eksperimen untuk mengetahui karakteristik turbin angin Darrieus-Savonius menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, maka energi yang dihasilkan semakin besar, oleh sebab itu koefisien daya dari turbin angin Darrieus-Savonius semakin meningkat. Desain turbin angin ini mampu menghasilkan daya 500 Watt pada kecepatan angin 7,5 m/s.

2.1.4. Akwa et al (2012)

Penelitian yang dilakukan oleh Akwa et al (2012) menyajikan sebuah review mengenai performa dari Turbin Angin Savonius dengan range koefisien daya rata-rata sebesar 0,05-0,30. Lalu performa rotor yang dihasilkan hingga 50% dari TSR untuk performa koefisien daya yang dihasilkan rotor.

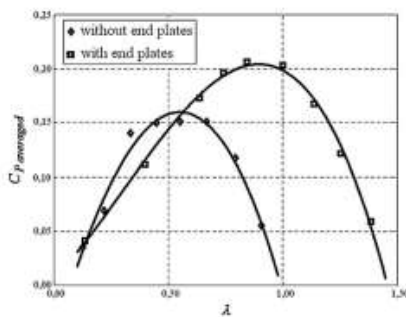
Tujuan penelitian ini secara umum adalah untuk memberikan informasi umum mengenai Turbin Angin khususnya tipe Savonius dan menyajikan ulasan mengenai performa yang dihasilkannya.

Pada artikelnya Akwa et al (2012) mengulas berbagai pengaruh desain rotor savonius terhadap performa Turbin Angin. Beberapa aspek yang dibahas antara lain pengaruh adanya endplate, pengaruh dari nilai aspect ratio, pengaruh dari jumlah sudu dan *stage* pada rotor. Selain itu



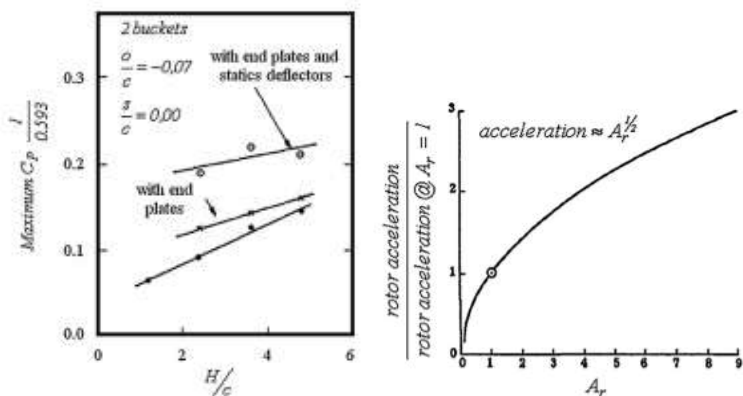
juga dibahas mengenai pengaruh nilai bilangan Reynolds dan besarnya Turbulent Intensity pada aliran fluida.

Yang pertama diulas adalah pengaruh dari ada tidaknya endplate pada rotor. Pada artikelnya disebutkan bahwa adanya endplate akan berpengaruh besar pada nilai koefisien daya rata-rata yang dihasilkan Turbin. Selain itu Turbin akan lebih efisien saat beroperasi pada TSR yang tinggi. Hal ini disebabkan karena endplate pada ujung-ujung rotor mencegah larinya aliran udara dari sisi cekungan sudu ke free stream, selain itu juga berfungsi untuk menjaga perbedaan tekanan antara sisi cekung dan cembung dari blade Savonius.



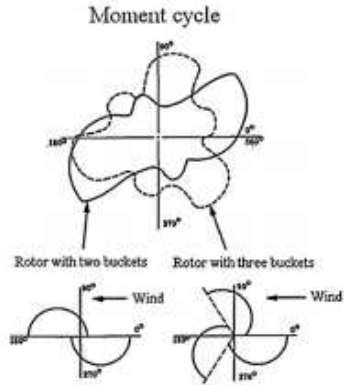
Gambar 2. 23 Kurva pengaruh adanya Endplate dari penelitian Ushiyama et al (1988) (Akwa et al, 2012).

Yang kedua yakni mengenai aspect ratio yang didapat dari angka tak berdimensi dari perbandingan antara tinggi rotor dan diameter rotor. Disebutkan bahwa rotornya memiliki aspect ratio (A) yang tinggi akan mengalami losses akibat pengaruh dari tip pada sudu. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya separasi aliran yang terjadi pada daerah tip.

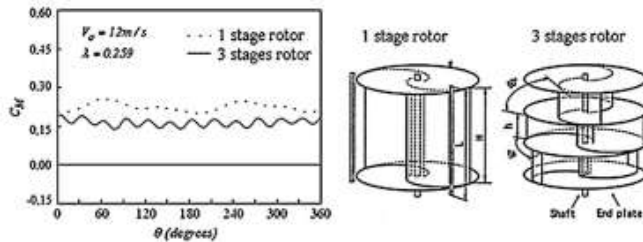


Gambar 2. 24 Kurva pengaruh nilai aspect ratio pada rotor hasil penelitian Vance et al (1978) (Akwa et al, 2012).

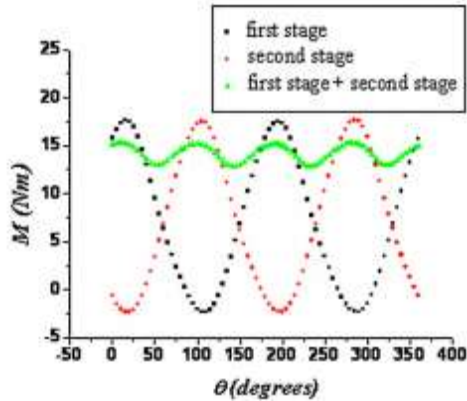
Selanjutnya mengenai banyaknya sudu dan jumlah *stage* pada rotor. Disebutkan bahwa adanya tambahan sudu pada rotor menyebabkan penurunan nilai maksimum daya dan koefisien moment angular yang bisa dicapai oleh rotor. Hal tersebut dikarenakan oleh aliran udara yang terdefleksi pada sudu satu akan mempengaruhi aliran udara yang menuju sudu lainnya, dan hal tersebut akan terjadi antara satu sudu ke sudu selanjutnya dan selanjutnya sehingga akan terjadi “cascade effect”. Pada akhirnya energi yang dikonversikan dari aliran angin akan turun. Maka dari itu Akwa et al (2012) menilai bahwa rotor Savonius dengan dua sudu akan memberikan performa yang terbaik. Sedangkan penambahan *stage* berkaitan dengan fluktuasi pada siklus momen yang bekerja pada rotor. Selain itu akan ada penambahan kemampuan pada rotor untuk mengekstraksi energi angin hingga nilai tertentu.



Gambar 2. 25 Kurva pengaruh jumlah sudu terhadap moment angular rotor (Akwa et al, 2012).

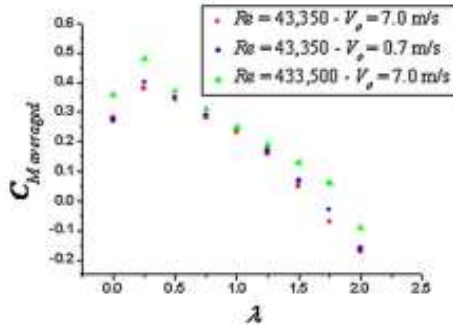


Gambar 2. 26 Kurva pengaruh jumlah *stage* terhadap koefisien daya rotor hasil penelitian Saha et al (2008) dan Hayashi et al (2005) (Akwa et al, 2012).



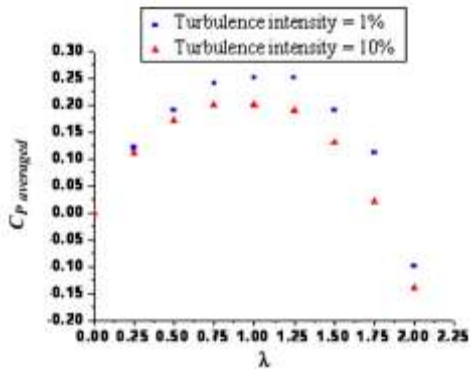
Gambar 2. 27 Kurva Penjumlahan Momen Angular Rotor (Akwa et al, 2010).

Lalu mengenai pengaruh bilangan Reynold dan turbulent intensity terhadap rotor. Meningkatnya bilangan Reynold artinya adalah naiknya nilai momentum dari aliran fluida itu sendiri, selain itu juga karakteristik boundary layer yang terbentuk akan berbeda. Disebutkan bahwa naiknya nilai bilangan Reynold akan mempengaruhi daerah separasi dari aliran pada sudu Savonius. Mundurnya separasi tersebut dapat menurunkan nilai pressure drag pada sisi sudu returning yang diakibatkan oleh terjadinya pressure recovery, naiknya gaya angkat dan meningkatnya momentum angular rotor.



Gambar 2. 28 Kurva moment koefisien pada berbagai nilai Re (Akwa et al, 2010).

Sedangkan nilai dari turbulent intensity sendiri akan mempengaruhi kualitas dari aliran yang melalui rotor turbin ini. Kualitas aliran yang semakin turbulen akan mengakibatkan turunnya nilai koefisien daya rata-rata.

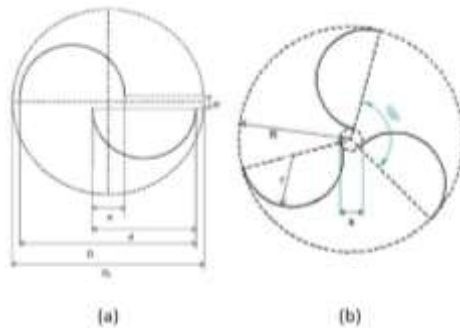


Gambar 2. 29 Kurva Performa koefisien daya rotor terhadap turbulent intensity pada $Re=867000$ (Akwa et al, 2010).

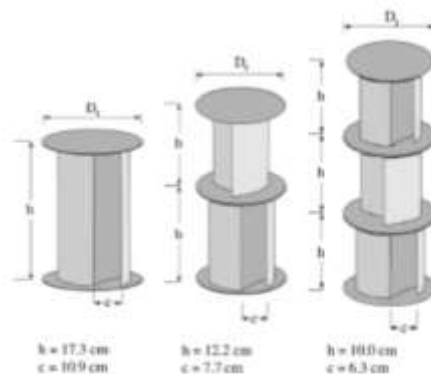


2.1.5. Saha et al (2008)

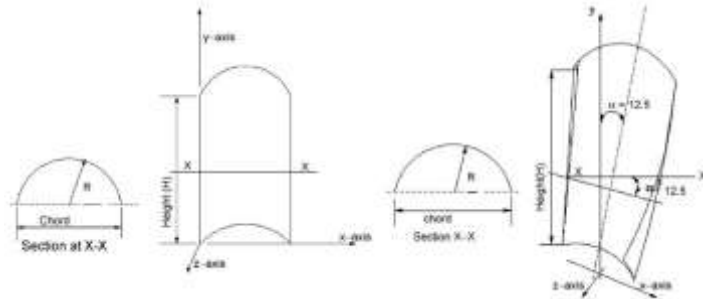
Saha et al (2008) melakukan uji eksperimen untuk menguji performa rotor turbin angin Savonius dengan berbasis pada jumlah tingkat, jumlah sudu, dan geometri sudu. Gambar 2.30, 2.31, dan 2.32 berturut-turut menunjukkan geometri turbin angin Savonius dua sudu, tiga sudu, dan geometri sudu yang diteliti oleh Saha et al (2008).



Gambar 2. 30 Geometri turbin angin Savonius variasi sudu (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Saha et al, 2008)



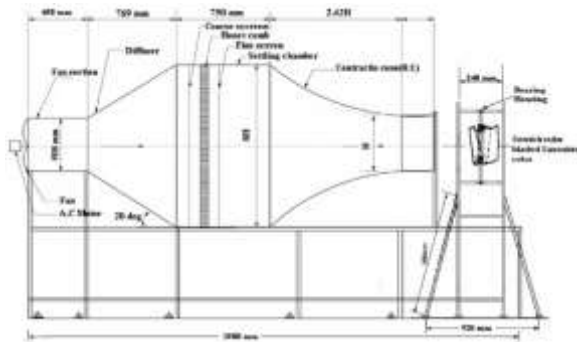
Gambar 2. 31 Geometri turbin angin Savonius variasi *stage* (Saha et al, 2008)



Gambar 2. 32 Geometri sudu (semicircular dan twisted) (Saha et al, 2008)

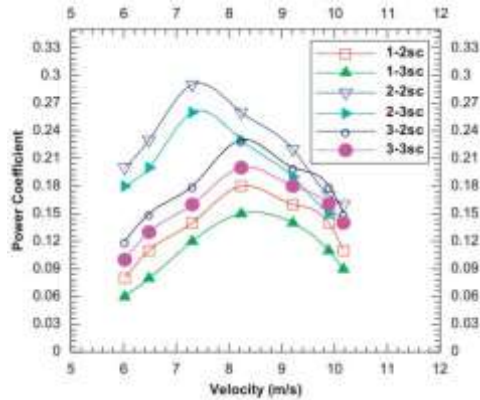
Tujuan uji eksperimen ini adalah untuk mempelajari performa rotor dengan variasi 1, 2, dan 3, tingkat; 2 dan 3 sudu; dan menggunakan sudu *semicircular* dan *twisted*. Lalu membandingkan koefisien daya tiap variasi. Kemudian dilakukan optimasi konfigurasi rotor berdasarkan jumlah tingkat, jumlah sudu, dan geometri sudu.

Uji eksperimen ini dilakukan di *low speed wind tunnel* yang ditunjukkan pada gambar 2.33. Rotor ditaruh sejauh 205 mm dari *exit wind tunnel* yang memiliki *cross-section area* sebesar 375 mm x 375 mm. Kecepatan angin diatur pada rentang 6 hingga 10 m/s. Hasil yang didapatkan pada uji eksperimen ini adalah grafik koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan berbagai konfigurasi yang dipilih.

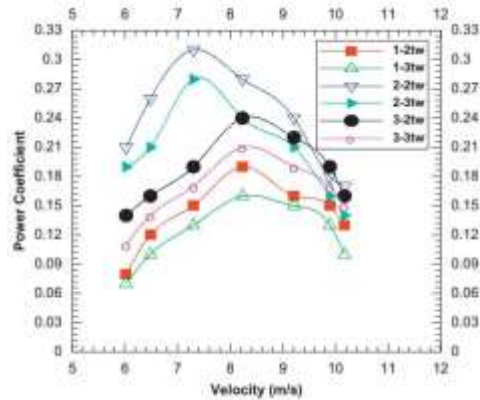


Gambar 2. 33 Low speed wind tunnel (Saha et al, 2008)

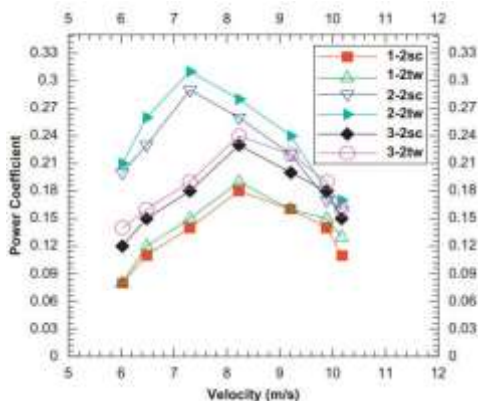
Pada rotor sudu *semicircular* dengan variasi jumlah tingkat dan sudu, didapatkan koefisien daya terbesar dimiliki oleh rotor dua tingkat dan dua sudu, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.34. Pada rotor sudu *twisted* dengan variasi jumlah tingkat dan sudu, didapatkan koefisien daya terbesar dimiliki oleh rotor dua tingkat dan dua sudu, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.35. Lalu bisa dilihat sudu *twisted* menunjukkan koefisien daya yang lebih baik apabila dibandingkan dengan sudu *semicircular*, dengan variasi hanya jumlah tingkat yang ditunjukkan oleh gambar 2.36. Hal ini disebabkan oleh gaya maksimal sudu *twisted* lebih besar yang dihasilkan oleh lengan momen yang lebih panjang.



Gambar 2. 34 Koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan sudu *semicircular* dengan variasi jumlah sudu dan tingkat (Saha et al, 2008)



Gambar 2. 35 Koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan sudu *twisted* dengan variasi jumlah sudu dan tingkat (Saha et al, 2008)



Gambar 2. 36 Koefisien daya terhadap kecepatan angin dengan dua sudu dengan variasi geometri sudu dan jumlah tingkat (Saha et al, 2008)

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. Energi Angin.

Angin adalah suatu fenomena alam yang secara alami terjadi dalam kehidupan sehari-hari. Angin sendiri bisa dikatakan sebagai pergerakan udara akibat adanya faktor-faktor alami misalnya adanya perbedaan tekanan udara antara suatu tempat dengan tempat yang lain akibat adanya perbedaan suhu, ketinggian dari permukaan laut atau pun faktor lainnya.

Pergerakan udara tersebut mengindikasikan adanya pergerakan partikel-partikel fluida pada udara. Yang artinya dari pergerakan tersebut ada energi kinetik yang bisa dimanfaatkan untuk menggerakkan suatu alat konversi energi. Maka dari itu turbin angin dibuat dan dimaksudkan untuk mengkonversi energi kinetik dari pergerakan udara tersebut sehingga dapat dimanfaatkan menjadi suatu energi dalam bentuk lain misalnya energi listrik.



Proses pemanfaatan energi angin dilakukan melalui dua tahapan konversi energi, pertama aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling) yang menyebabkan rotor berputar selaras dengan angin yang bertiup, kemudian putaran dari rotor dihubungkan dengan generator, dari generator inilah dihasilkan arus listrik. Jadi proses tahapan konversi energi bermula dari energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor kemudian menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Rotor (kincir), rotor turbin sangat bervariasi jenisnya, diameter rotor akan berbanding lurus dengan daya listrik. Semakin besar diameter semakin besar pula listrik yang dihasilkan, dilihat dari jumlah *blade* rotor (baling-baling), *blade* dengan jumlah sedikit berkisar antara 2-6 buah lebih banyak digunakan.
2. Kecepatan angin, kecepatan angin akan mempengaruhi kecepatan putaran rotor yang akan menggerakkan generator.
3. Jenis generator, generator terbagi dalam beberapa karakteristik yang berbeda, generator yang cocok untuk Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) adalah generator yang dapat menghasilkan arus listrik pada putaran rendah.

Listrik yang dihasilkan dari Sistem Konversi Energi Angin akan bekerja optimal pada siang hari di mana angin berhembus cukup kencang dibandingkan dengan malam hari, sedangkan penggunaan listrik biasanya akan meningkat pada malam hari. Untuk mengantisipasinya, sistem ini sebaiknya tidak langsung digunakan untuk keperluan



produk-produk elektronik, namun terlebih dahulu disimpan dalam satu media seperti baterai atau aki sehingga listrik yang keluar besarnya stabil dan bisa digunakan kapan saja. Syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan kincir angin dan jari-jari 1 meter dapat dilihat seperti pada tabel 2.2. Klasifikasi angin pada kelompok 3 adalah batas minimum dan angin pada kelompok 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Tabel 2. 1 Tingkatan kecepatan angin 10 meter di atas permukaan tanah (World Wind Energy Association, 2007)

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0,00 – 0,02	—
2	0,3 – 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah terasa ada angin, daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5,5 – 7,9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8,0 – 10,7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 – 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air plampung berombak kecil
8	13,9 – 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 – 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20,8 – 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24,5 – 28,4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 – 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 – 36,9	Tornado



2.2.2. Aerodinamika Vertical Axis Wind Turbine (VAWT).

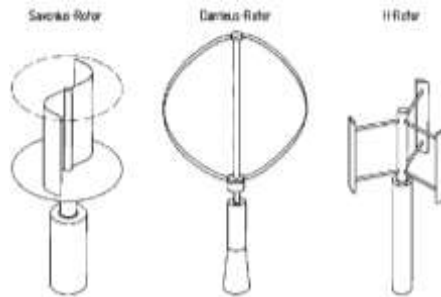
Berdasarkan interaksi arah putaran rotor turbin angin dan arah angin datang, turbin angin pada umumnya diklasifikasikan menjadi dua tipe yakni *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah salah satu jenis turbin angin yang memiliki sumbu rotasi yang tegak lurus terhadap arah angin yang datang. Sedangkan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah jenis turbin angin yang sumbu rotasinya searah dengan arah angin datang. Kedua jenis turbin angin tersebut memiliki karakteristik kerja terhadap aliran fluida yang berbeda yang dikarenakan interaksi aliran fluida datang yang menabrak baling-baling (*blade*) memiliki perbedaan *local angle of attack*, perbedaan karakter wake, dll.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) yang bekerja dengan sumbu rotasi tegak lurus terhadap arah angin yang datang akan memiliki kemampuan untuk menangkap angin dari segala arah tanpa memerlukan mekanisme *yawing*. Namun karena sumbu rotasinya yang tegak lurus terhadap arah datangnya angin, VAWT mengalami *unsteady aerodynamics* yang sangat kompleks seperti *local angle of attack* yang tinggi serta adanya pengaruh interaksi wake yang datang dari blade yang berada di sisi *upwind* serta *center post*.

Ada dua buah tipe *blades* VAWT yaitu *Savonius* dan *Darrieus*. *Savonius* dikenal sebagai *drag driven* VAWT, geometri *blade Savonius* berupa mangkuk yang menyerupai anemometer berfungsi untuk memproduksi gaya *drag* agar rotor dapat berputar. Sedangkan *Darrieus* dikenal sebagai *lift driven* VAWT, geometri *blade Darrieus* berupa *airfoil*



yang menyerupai *egg beater* berfungsi untuk memproduksi gaya *lift*. Gaya-gaya ini digunakan untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi kinetik rotasi dari turbin. Energi kinetik rotasi inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Gambar 2.37 menunjukkan berapa contoh turbin angin dengan sumbu vertikal (VAWT).



Gambar 2. 37 Varian turbin angin sumbu vertikal.

Besar kecilnya Kecepatan rotasi (ω) dari VAWT sangatlah bergantung pada kecepatan angin yang datang. Kecepatan rotasi ini biasanya direpresentasikan oleh konstanta tak berdimensi yang dikenal sebagai *tip speed ratio* (λ atau TSR). TSR merupakan rasio dari kecepatan tangensial *blade* pada Jari-jari rotor turbin (R) terhadap *free stream velocity* (U_∞). Secara matematis TSR dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_\infty} \quad (2.1)$$

TSR merupakan parameter yang sangat penting dalam analisis turbin angin. Parameter dari performa turbin angin, seperti *torque coefficient* (C_T) dan *power coefficient* (CP) biasanya disajikan sebagai fungsi TSR maupun sebagai fungsi waktu untuk nilai TSR tertentu. CP



merepresentasikan sejauh mana kemampuan turbin angin tersebut dapat mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi kinetik rotasi turbin yang menggerakkan generator. Dengan kata lain CP dapat didefinisikan sebagai efisiensi dari turbin, yang menggambarkan perbandingan antara *shaft power* (P_S) dengan *wind power* (P_W).

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A (U_\infty)^3 \quad (2.2)$$

dimana A merupakan *swept area*, yaitu perkalian antara *blade span* (H) dengan diameter turbin (D) dan ρ adalah rapat massa (*density*) udara.

$$CP = \eta = \frac{P_S}{P_W} = \frac{P_S}{\frac{1}{2} \rho A (U_\infty)^3} \quad (2.3)$$

Sedangkan C_T merupakan rasio dari *shaft torque* (T_S) terhadap *thrust* yang bekerja searah dengan *free stream*.

$$C_T = \frac{T_S}{\frac{1}{2} \rho A (U_\infty)^2 R} \quad (2.4)$$

Hubungan *shaft power*, kecepatan rotasi, dan *shaft torque* secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$P_S = \omega T_S \quad (2.5)$$

Sehingga didapat hubungan CP, TSR, dan C_T :

$$CP = \lambda C_T \quad (2.6)$$

Selanjutnya yakni tentang *Reynolds number* yang menjadi parameter tak berdimensi penting lainnya. Secara fisik *Reynolds number* adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous* dalam suatu aliran. *Reynolds number* pada umumnya digunakan untuk menentukan apakah suatu aliran termasuk ke dalam aliran laminar, transisi, atau turbulen relatif terhadap *body* yang dilaluinya.

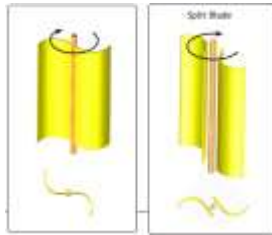


$$Re = \frac{\rho_{\infty} U_{\infty} L_C}{\mu_{\infty}} = \frac{U_{\infty} L_C}{\nu_{\infty}} = \frac{U_{\infty} D}{\nu_{\infty}} \quad (2.7)$$

L_C merupakan panjang karakteristik dimana dalam analisis turbin angin ini, panjang karakteristik merupakan diameter (D) dari rotor turbin angin, adapun, μ_{∞} adalah viskositas dinamik dan ν_{∞} adalah viskositas kinematik dari fluida datang.

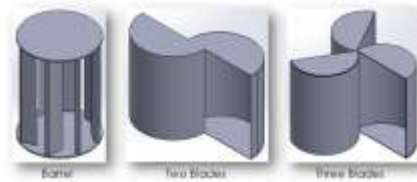
2.2.3. Turbin Angin Savonius.

Seperti pada penjeasan di atas, Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin VAWT yang memanfaatkan gaya drag untuk memutar rotornya. Turbin ini dikembangkan dengan desain yang memungkinkan turbin dapat menangkap angin dari arah mana saja agar dapat berputar. Turbin angin Savonius merupakan jenis turbin angin dengan desain paling sederhana. Perbedaan gaya dorong antara *blade* satu dan *blade* lainnya menyebabkan rotor turbin angin Savonius dapat berputar. Permasalahan yang sering timbul pada desain turbin angin Savonius adalah besarnya kecepatan angin yang menghantam permukaan turbin angin berbeda-beda. Besarnya kecepatan angin di bagian dasar rotor turbin angin Savonius terkadang lebih rendah daripada angin yang menghantam permukaan dinding bagian atas rotor sehingga perputaran turbin menjadi kurang optimal karena *blade* turbin angin ini mengarah vertikal ke bawah. Gambar 2.38 menunjukkan turbin angin Savonius.



Gambar 2. 38 Turbin angin Savonius.

Terdapat beberapa jenis *blade* pada turbin angin Savonius yaitu, tipe *barrel*, tipe *S*, tipe *helical*, dan tipe *twisted*. Pada umumnya untuk *blade* tipe *S* yang seringkali digunakan adalah dua *blade* dan tiga *blade*. Gambar 2.39 dan 2.40 berturut-turut menunjukkan jenis *blade* turbin angin Savonius.



Gambar 2. 39 Jenis blade turbin angin Savonius tipe barrel dan S



Gambar 2. 40 Modifikasi blade Savonius: a) Blade helical b) Blade twisted.



2.2.4. Model Turbulensi

Sebuah penelitian metode numerik secara umum akan dibagi menjadi tiga bentuk utama, yaitu *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES), dan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). DNS memiliki teknologi yang paling baik dalam menyelesaikan *space* maupun *time scales* sehingga akan memerlukan teknologi komputasi yang tinggi, maka penggunaan metode ini memerlukan biaya komputasi yang tinggi pula apabila diterapkan pada kasus penelitian ini. Penggunaan metode LES juga akan memerlukan biaya komputasi yang tinggi untuk diterapkan pada simulasi aliran pada Turbin Angin ini, meskipun sifat dasar metode LES adalah 3D namun metode ini tidak dipakai mengingat batasan permasalahan dari penelitian ini tidak menganalisis perilaku dan fenomena aliran fluida lebih mendalam. *Unsteady* RANS (URANS) merupakan metode komputasi aliran fluida dengan biaya komputasi yang rendah dan akurasi yang dapat diterima, oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan metode URANS.

Kemunculan beberapa model turbulensi di dalam dunia simulasi CFD telah mempengaruhi banyak penelitian mengenai simulasi VAWT. Kualitas simulasi yang sangat baik dan telah terbukti dapat melakukan prediksi dengan sangat baik pada berbagai kasus membuat model *standard k-ε* akhirnya menjadi populer di kalangan para peneliti. Ferreira et al (2007), Qing et al (2011), Howell et al (2010), Beri et al (2011), dan Untaroiu et al (2011) melakukan simulasi VAWT menggunakan model *standard k-ε* beserta variannya. Hasilnya menunjukkan bahwa model *k-ε* tidak dapat melakukan perhitungan dengan tepat untuk kasus-kasus dengan *adverse pressure gradient* yang besar dan *strong*



separation. Kelakuan dari *turbulent boundary layer* hingga peristiwa separasi menjadi hal yang sulit dilakukan bila menggunakan model turbulensi $k-\epsilon$, hal ini menyebabkan para peneliti beralih pada model turbulensi lain yang lebih baik dalam *near wall modeling*, yaitu model *standard $k-\omega$* .

Model $k-\omega$ terbukti berhasil untuk aliran dengan *moderate adverse pressure gradients* namun gagal untuk memprediksi aliran dengan *pressure induced separation*. Selain itu, model ini juga menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap nilai ω pada daerah *freestream* (Menter, 2003). Hal ini sangat tidak diinginkan karena dapat menyebabkan hasil yang sangat tidak akurat untuk kasus aliran kompleks. Karena keterbatasan ini para peneliti mulai beralih menggunakan varian dari model *standard $k-\omega$* , yaitu *Shear-stress transport $k-\omega$ ($k-\omega$ SST)*.

Pada saat ini, model turbulensi *hybrid $k-\omega$ SST* menjadi semakin populer untuk menyelesaikan kasus pemodelan dan simulasi VAWT karena model ini merupakan kombinasi antara kemampuan $k-\omega$ untuk aliran di dekat dinding dengan *freestream stability* dan model $k-\epsilon$. Model turbulensi ini lebih akurat dan lebih dapat diandalkan dibandingkan model *standard $k-\omega$* untuk jenis aliran yang lebih luas, mencakup *adverse pressure gradient flows*, aliran di sekitar *airfoil*, serta *transonic shock waves* (Leishman, 2006). Dai et al (2009) dan Consul et al (2009) melakukan studi numerik *Darrieus turbine* untuk aplikasi turbin pasang surut air laut menggunakan model $k-\omega$ SST. Hasilnya nilai CP yang didapat dari model $k-\omega$ SST hanya sedikit *over predicts* nilai CP pada kondisi operasional padahal simulasi yang dilakukan hanyalah simulasi 2D.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. VARIASI DAN DOMAIN SIMULASI

3.1.1. Variasi

Pada penelitian ini akan dilakukan dengan metode simulasi numerik menggunakan bantuan *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Penelitian dengan metode simulasi numerik pada umumnya akan dilakukan melalui tiga tahapan utama yakni *Pre-Processing*, *Processing* dan *Post-Processing*. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika dan Mesin-mesin Fluida.

Model yang akan dibuat berupa sebuah geometri tiga dimensi dari turbin angin tipe *Savonius* yang divariasikan jumlah *stage* pada berbagai kecepatan angin. Variasi penelitian ditunjukkan pada table 3.1 di bawah ini.

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

Parameter	Nilai		
Jumlah <i>Stage</i>	1, 2 dan 3		
Kecepatan Angin (m/s)	5	10	15
Putaran Turbin (rpm)	400	900	1500
TSR	0.63	0.71	0.79
Jumlah <i>Frame</i> ($/360^{\circ}$)	72		

3.1.2. Domain Simulasi

Pada studi numerik, *domain* simulasi yang hendak dibuat harus disesuaikan semirip mungkin dengan kondisi operasi benda uji dan *test section*. Dalam kasus penelitian ini domain simulasi akan dibagi menjadi dua, yakni *static domain* dan *rotating domain*. *Static domain* adalah *domain*

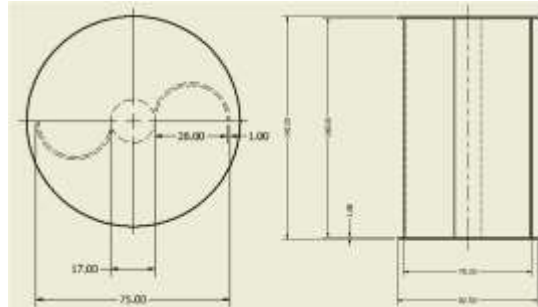


terluar yang dilintasi oleh fluida dan *domain* ini tidak bergerak. *Domain* ini ditunjukkan dengan bentuk persegi yang mengelilingi *rotating domain*. *Rotating domain* ditunjukkan dengan bentuk lingkaran yang mengelilingi sudu-sudu dan poros turbin angin Savonius. *Rotating domain* ini akan diperlakukan sebagai *rotation motion* di mana turbin angin berputar dengan *time step* tertentu.

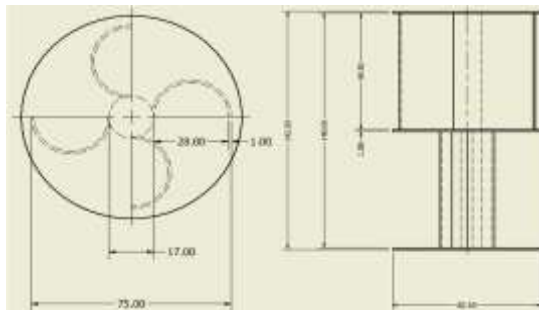
3.2. TAHAP PRE-PROCESSING

3.2.1. Pembuatan Geometri dan Meshing

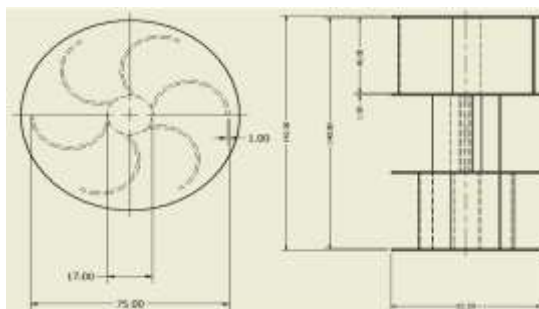
Tahap paling awal pada penelitian secara simulasi numerik yakni pembuatan geometri dari model turbin angin Savonius disertai dengan sebuah geometri bantuan berupa balok yang akan berfungsi sebagai *wind tunnel*. Setelah membuat model-model tersebut hal yang dilakukan adalah mendefinisikan tiap sisi atau *face*. Gambar 3.1 menunjukkan geometri turbin angin Savonius satu *stage*, gambar 3.2 menunjukkan geometri turbin angin Savonius dua *stage* dan gambar 3.3 menunjukkan geometri turbin angin Savonius tiga *stage*. Diameter rotor ($D = 75$ mm) menjadi acuan pada pembuatan geometri, dengan diameter poros 17 mm dan diameter sisi dalam sudu 28 mm sedangkan sisi luar sudu 30 mm. Kemudian pada sisi atas dan bawah masing-masing terdapat sebuah *endplate* dengan diameter *overlap* sebesar 10%D Selanjutnya adalah geometri *wind tunnel* dengan panjang *inlet* adalah 3D, *outlet* adalah 6D dan panjang maupun lebar pada irisan melintang di daerah *test section* adalah 3D.



Gambar 3. 1 Turbin Angin Savonius dua sudu dan satu *stage*.



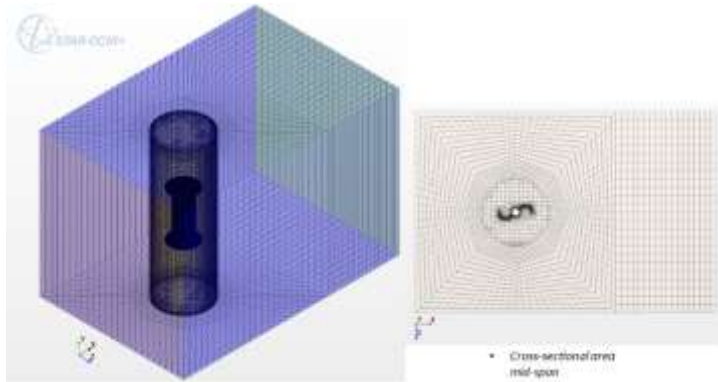
Gambar 3. 2 Turbin Angin Savonius dua sudu dan dua *stage*.



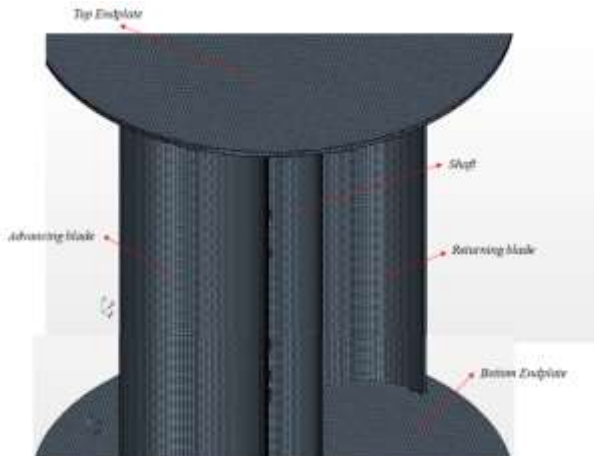
Gambar 3. 3 Turbin Angin Savonius dua sudu dan tiga *stage*.



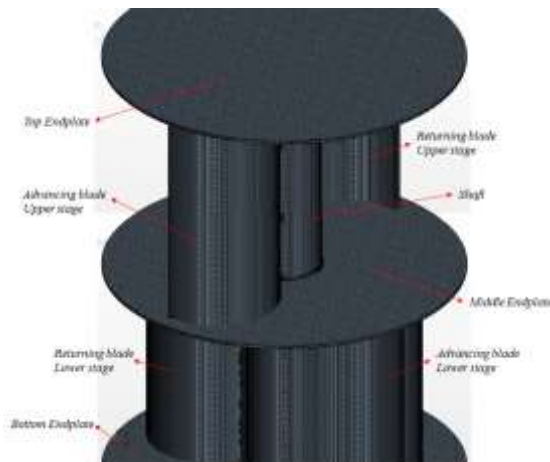
Kemudian langkah selanjutnya yaitu pembuatan *meshing*. Hal ini bertujuan untuk membagi geometri yang telah dibuat menjadi elemen-elemen kecil sehingga parameter yang ditentukan dapat diaplikasikan ke dalam setiap elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *tetrahedral mesh* dengan operasi *automated mesh*.



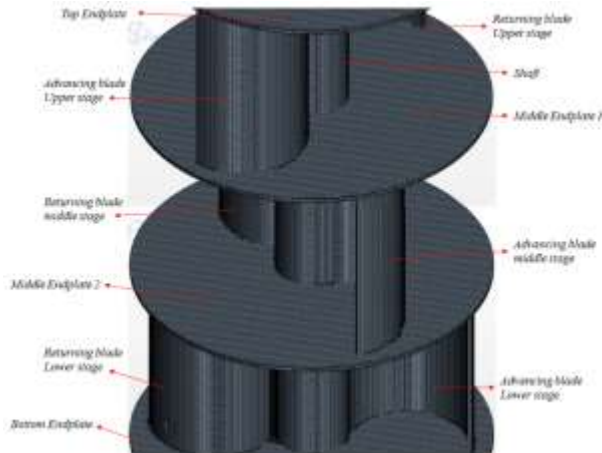
Gambar 3. 4 Meshing volume yang dibuat pada seluruh domain.



Gambar 3. 5 Meshing tiga dimensi pada Turbin Angin Savonius satu *stage*.



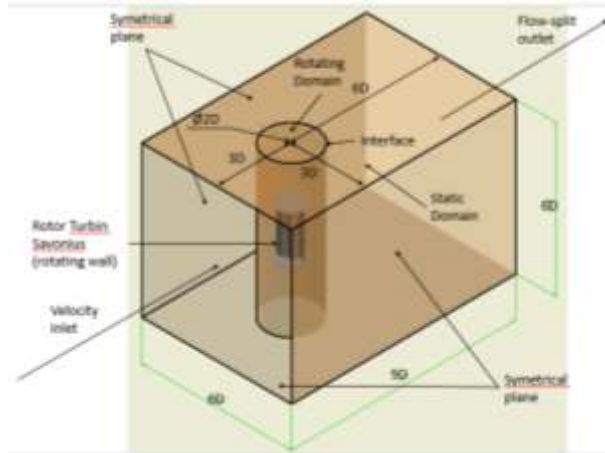
Gambar 3. 6 Meshing tiga dimensi pada Turbin Angin Savonius dua *stage*.



Gambar 3. 7 Meshing tiga dimensi pada Turbin Angin Savonius tiga *stage*.

3.2.2. Pengaturan *Boundary Condition*

Boundary Condition adalah penentuan batasan-batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji dengan menetapkan *inlet*, *outlet*, *wall*, *interface*, dan lain-lain pada geometri yang telah dibuat, yakni pada sudu, poros, titik temu antara dua *domain*, dan batas aliran eksternal. *Interface* adalah *boundary condition* berupa *wall* yang diatur supaya dapat ditembus oleh aliran fluida. *Boundary condition* pada *inlet* yaitu *velocity inlet* memiliki nilai 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* digunakan *flow-split outlet*. Pada titik temu antara dua *domain* dianalisis sebagai *interface*. Terakhir pada sudu dan poros menggunakan *wall* dengan *rotation motion* seperti ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3. 8 Boundary Condition pada permodelan simulasi.

Penggunaan satuan D dimaksudkan untuk perbandingan ukuran domain terhadap diameter rotor, yakni 75 mm. Sedangkan pengaturan *boundary condition* seperti pada gambar di atas berlaku sama baik untuk setiap simulasi satu *stage* rotor, dua *stage* maupun tiga *stage*.

3.2.3. Parameter Simulasi

3.2.3.1. Models

Pada langkah ini pemodelan aliran yang akan digunakan adalah *segregated flow*, *constant density* dengan *turbulence modelling k-omega SST*, dimana model ini dipilih karena memiliki cakupan aplikasi yang luas dan umum digunakan, serta parameter *implicit unsteady* dipilih dengan skema diskretisasi *second order upwind*. Diskretisasi *time step* yang digunakan adalah *second order*.



3.2.3.2. *Materials*

Pemodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan *density* 1,18415 kg/m³ (*constant*) dan *dynamic viscosity* 1.85508E-5 Pa.s (*constant*). *Setting* pada properties material ini disesuaikan dengan batasan masalah yakni *incompressible flow*.

3.2.3.3. *Rotation Motion & Rotating Reference Frame*

Turbin diputar dengan mengaplikasikan fitur *rotation* di *subnode motion* di dalam *node tools*, kemudian di dalam *subnode reference frame* akan muncul *subnode reference frame for rotation*. Pengaturan kecepatan putaran rotor diatur sesuai dengan data pada table 3.1.

3.3. **TAHAP PROCESSING**

Pada tahap *processing* ini, parameter-parameter yang telah ditetapkan pada saat *preprocessing* akan diiterasi hingga mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan, yakni ketika nilai residual mencapai 10⁻⁵, kecuali *continuity* di mana dianggap konvergen ketika residual mencapai 10⁻³. Jika kriteria konvergensi tercapai, maka langkah selanjutnya adalah tahap *post processing* dan apabila kriteria konvergensi tidak tercapai maka langkah kembali ke tahap pembuatan *meshing*.

Pada tahap *processing*, proses iterasi dilakukan dengan model *implicit unsteady* dengan skema diskritisasi yang dipilih adalah 2nd order dengan nilai time step yang diperoleh dari perhitungan yang melibatkan kecepatan angin dan putaran rotor. Model ini dipilih karena dengan simulasi ini diharapkan dapat menangkap fenomena unsteady pada



aliran yang melewati rotor turbin angin Savonius yang berputar.

Permodelan turbulen yang dipilih adalah *k-omega Shear-Stress Transport (SST)*. Dengan parameter turbulensi adalah *turbulence intensity* dan *turbulence length scale*. Model turbulen ini dipilih dengan tujuan untuk menangkap fenomena aliran yang terjadi khususnya di daerah dekat dinding, pada kasus ini yakni di daerah dekat sudu savonius.

3.4. TAHAP POST PROCESSING

Setelah diperoleh solusi numerik dari tahap *processing*, tahap berikutnya adalah tahap *post processing*, yaitu menganalisis dan mengambil data visualisasi hasil dari solusi numerik tersebut. Pada tahap ini akan diperoleh data berupa visualisasi aliran yang menampilkan hasil kontur scalar tertentu yaitu kontur kecepatan dan tekanan serta kurva nilai koefisien torsi dan daya fungsi TSR.

Pengambilan data mulai dilakukan pada saat rotor telah menempuh setidaknya dua kali putaran penuh. Hal tersebut dilakukan karena pada saat putaran pertama dan kedua, fenomena aliran fluida masih dalam pengaruh fenomena starting sehingga properties pada aliran yang melewati sudu dinilai tidak cukup relevan bila dilakukan pengambilan data untuk menganalisis performa rotor turbin. Sehingga pengambilan data-data dilakukan saat putaran ketiga pada berbagai *frame* yang berbeda.

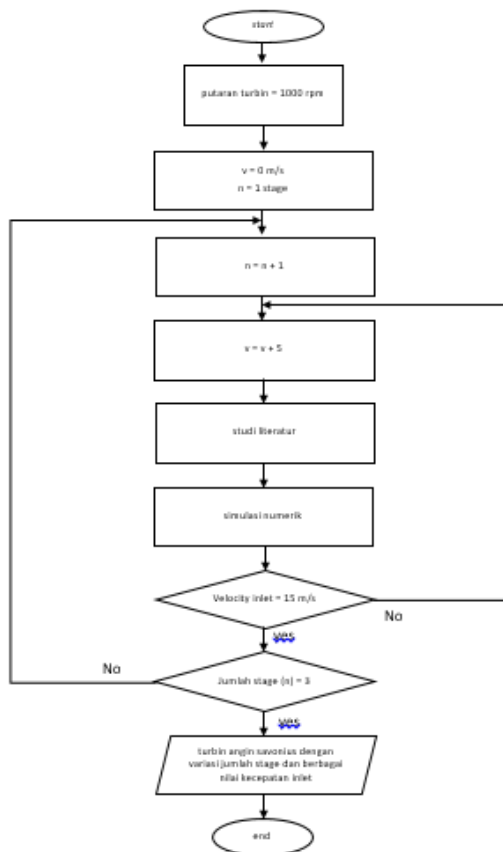
Setelah pengambilan data maka dilakukan perhitungan matematis untuk menganalisis performa dari rotor kemudian hasil perhitungan tersebut akan digunakan untuk pembuatan kurva-kurva. Selanjutnya data visualisasi dan kurva hasil pengolahan dari perhitungan akan



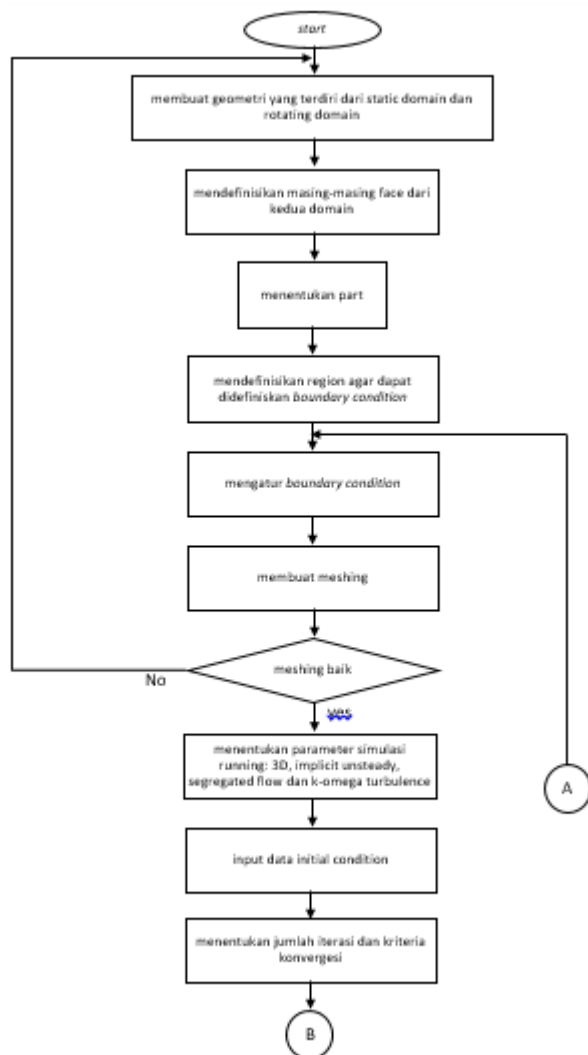
dibandingkan dan divalidasi dengan menggunakan data-data dari referensi penelitian terdahulu.

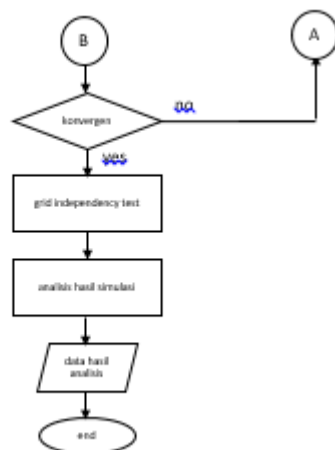
3.5. DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Pada penelitian ini terdapat diagram alir penelitian umum dan diagram alir simulasi numerik yang ditunjukkan sebagai berikut :



Gambar 3. 9 Flowchart Penelitian Umum





Gambar 3. 10 Flowchart Simulasi



BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI

Pada bab ini berisi tentang analisis dan diskusi dari hasil penelitian numerik berupa visualisasi aliran yang berupa kontur kecepatan aliran dan tekanan serta kurva hubungan nilai Torsi dan Koefisien Daya yang dihasilkan turbin angin terhadap *Tip Speed Ratio*.

4.1 SETTING PERMODELAN SIMULASI

Sebelum memulai permodelan simulasi unsteady, ada data yang harus dicari yakni *time step*, *Time Step* digunakan untuk melakukan pembacaan data torsi, kecepatan aliran dan tekanan selama permodelan putaran turbin berlangsung. Besar kecilnya data ini dipengaruhi oleh seberapa cepat putaran turbin. Berikut ini adalah tabel input data dan *time step* yang digunakan dalam permodelan simulasi.

Tabel 4. 1. Input Data dan *Time Step* Setiap Kecepatan Angin.

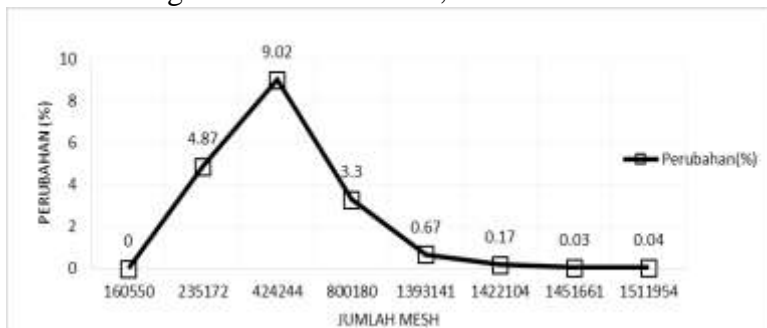
V (m/s)	Re	RPM	TSR	Kecepatan sudut (rad/s)	Jumlah Frame	1 putaran (360°)	1 frame (5°)
5	23.874	400	0,63	41,89	72	0,150	2,08E-03
10	47.748	900	0,71	94,25		0,067	9,26E-04
15	71.622	1500	0,79	157,08		0,040	5,56E-04



4.2 JUSTIFIKASI PARAMETER DAN HASIL

4.2.1 *Grid Independency Test*

Dalam melakukan penelitian berupa simulasi numerik dengan bantuan *software* komputasi aliran fluida perlu dilakukan sebuah pengujian jumlah *grid* pada *meshing* yang bertujuan untuk memastikan bahwa jumlah *grid* pada *meshing* sudah tidak lagi berpengaruh terhadap hasil simulasi. Pada penelitian ini *Grid Independency Test* dilakukan dengan cara membandingkan jumlah *grid* di beberapa tipe *meshing* dengan nilai *wall Y+* dan Torsi pada saat turbin mencapai posisi 90° atau dengan kata lain posisi sudu turbin tegak lurus dengan aliran datangnya angin dengan kecepatan 10 m/s. Hasil dari proses *Grid Independency Test* dapat dilihat pada gambar 4.1. Dari justifikasi jumlah *mesh* ini digunakan *mesh* sebanyak 1451661 dengan nilai *wall Y+* = 9,839.



Gambar 4. 1. Kurva Perubahan Nilai pada *Grid Independency Test*.

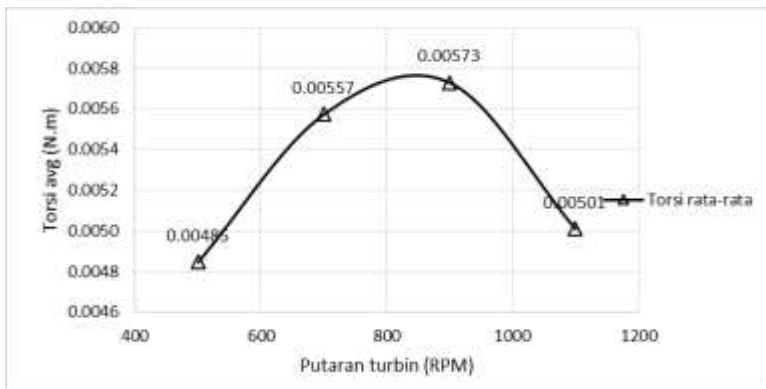
4.2.2 Validasi Kondisi Operasi pada Simulasi

Sebuah penelitian dengan metode simulasi akan dapat diterima hasilnya apa bila telah dilakukan validasi



pada data-data input dan hasil simulasinya. Dalam hal ini metode validasi yang dilakukan adalah dengan memeriksa tingkat relevansi input putaran turbin terhadap input nilai kecepatan angin dan perbandingan kualitatif terhadap kontur kecepatan aliran hasil simulasi.

Yang pertama yakni validasi mengenai input data putaran turbin. Validasi dilakukan dengan membandingkan torsi yang dihasilkan oleh turbin mulai dari putaran 500-1100 RPM dengan kecepatan angin 10 m/s. Dari validasi yang dilakukan telah didapatkan hasil pada gambar kurva 4.2. Sehingga untuk kecepatan angin 10 m/s dipilih putaran turbin sebesar 900 RPM karena nilai torsi rata-ratanya sudah mendekati nilai tengah dari masing-masing variasi.



Gambar 4. 2. *Testing* Parameter Putaran Turbin pada $V = 10$ m/s.

4.2.3 Validasi Parameter Permodelan Simulasi

Permodelan simulasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah simulasi aliran 3 dimensi dengan pemilihan kondisi *Incompressible*, kecepatan angin datang dalam keadaan konstan, kondisi *unsteady* juga dipilih untuk



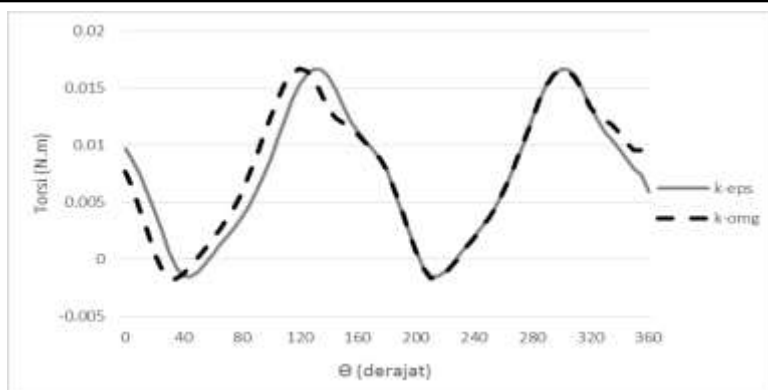
melihat fenomena aliran turbulen yang terjadi pada saat turbin angin tersebut berputar dan permodelan turbulensi yang dipilih untuk simulasi adalah menggunakan *K-omega Shear Stress Transport (SST)*.

Pemilihan permodelan turbulensi tersebut didasari sesuai pada tinjauan pustaka pada bab sebelumnya bahwa model tersebut memang direkomendasikan untuk memberikan hasil yang lebih akurat dan lebih luas cakupannya untuk fenomena aliran dengan *adverse pressure gradient*, aliran pada *airfoil*, *transonic waves*, dll. Sebagai bahan pertimbangan pemilihan, perbandingan hasil simulasi pun dilakukan dengan mengamati perbedaan nilai Torsi dari turbin. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 dan gambar kurva 4.3.

Tabel 4. 2. Justifikasi pemilihan *Turbulence Modeling*.

Model	V (m/s)	RPM	ω (rad/s)	TSR	Torsi avg(N.m)	CT	CP	Perbedaan (%)
K- epsilon	10	900	94,25	0,71	5,89E-03	0,32	0,175	-
K- omega	10	900	94,25	0,71	5,73E-03	0,31	0,171	2.71

Sedangkan secara siklus torsi yang bekerja pada Turbin sendiri hasilnya relatif sama pada saat digunakan model *k-epsilon* maupun *k-omega*. Secara kuantitatif perbedaan eror pada pemilihan alternatif *turbulence modeling* tersebut adalah 2.71% seperti disebutkan pada tabel 4.2.



Gambar 4. 3. *Testing Parameter Turbulence Modeling* pada Turbin.

4.3 PERBANDINGAN HASIL SIMULASI 2D DAN 3D

4.3.1 *End Wall Effect* pada Simulasi Aliran 3D

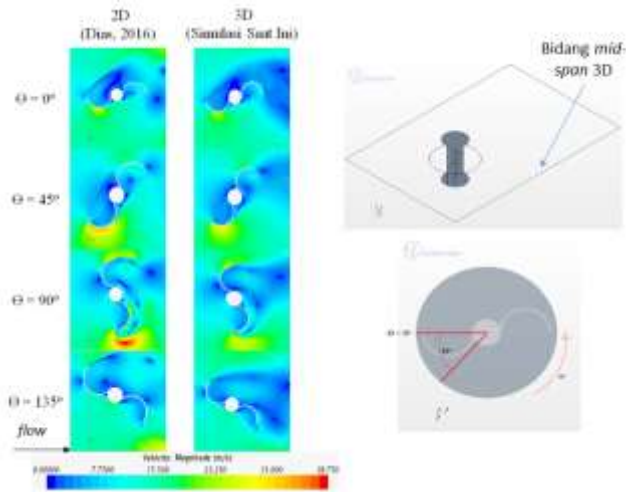
Simulasi 2D mengenai Turbin Angin Savonius Dua Sudu dengan geometri serupa telah dilakukan oleh Dias (2016) menganggap bahwa fenomena aliran fluida yang mengalir saat turbin berputar dianggap sama sepanjang ketinggian turbin. Sedangkan pada simulasi aliran secara 3D pada penelitian ini turbin angin memiliki komponen *endplate* pada tepi atas dan bawah rotor. Hal tersebut tentunya akan mengakibatkan fenomena aliran fluida menjadi berbeda dengan daerah tengah rotor yang jauh dari *endplate*.

Secara umum bentuk geometri 2D dan 3D pada daerah *mid-span* adalah sama. Permodelan yang dilakukan menggunakan *setting* kondisi batas yang sama yakni *rotating wall* pada sudu turbin dan *symmetrical plane* pada dinding *wind tunnel*. Kondisi inlet diatur sama yakni dengan



kecepatan sama 15 m/s dan spesifikasi *turbulence intensity* dan *turbulence length scale*.

Pada simulasi aliran secara 2D, hasil streamline aliran dapat diperkirakan hanya dengan melihat kontur kecepatan yang diperoleh setelah proses *running*. Sedangkan pada kasus 3D dimana ada komponen *endplate* pada tepi atas dan bawah rotor tentunya bentuk streamline alirannya akan berbeda.

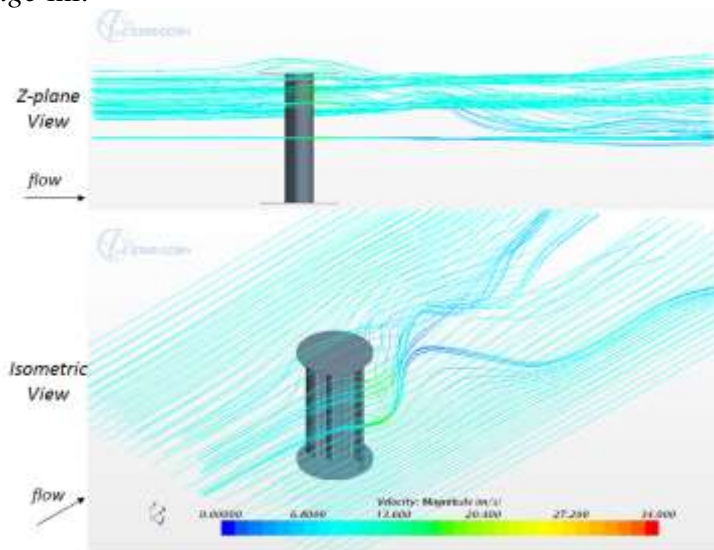


Gambar 4. 4. Perbandingan Hasil Kontur Kecepatan pada Simulasi Turbin Angin Savonius pada $V = 15$ m/s konstruksi *Single Stage*.

Dari gambar perbandingan kontur kecepatan di dalam gambar 4.4 menandakan bahwa memang simulasi 3D mendapatkan hasil kecepatan yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil simulasi 2D. Pada gambar tersebut dapat dilihat pada sudut yang sama, secara umum pada daerah *mid-span* fenomena yang terjadi relatif sama. Hanya saja



memang pada hasil 3D memiliki perbedaan nilai besaran kecepatan. Perbedaan besaran kecepatan tersebut disebabkan adanya efek aliran 3D dari daerah *endplate* atas dan bawah yang mengarah ke daerah *mid-span*. Pada gambar 4.5 akan ditunjukkan gambaran mengenai streamline aliran 3D yang melewati turbin angin *single stage* ini.



Gambar 4. 5. *Streamline* Aliran Fluida Diambil pada $y = 0,45h$, $y = 0,25h$ dan $y = 0$ (*mid-span*) Saat Sudu Berputar 90° .

Pada gambar 4.5 dapat dilihat streamline aliran di daerah dekat *endplate* ($0,9h$ dari tepi *mid-span*) dimana berdasarkan bentuk streamline aliran pada gambar, dapat diketahui bahwa ada aliran dari bagian atas dan bawah rotor yang ikut berperan dalam pembentukan wake di belakang Turbin Angin Savonius *Single Stage* ini. Sedangkan pada 2D hanya diamati pada daerah *mid-span*. Interaksi aliran downstream



di daerah endplate ke arah mid-span menandakan adanya aliran sekunder yang mengganggu sehingga luasan efektif aliran pada sudu jadi berkurang.

4.3.2 Perbandingan Performa Turbin

Analisa performa turbin dari hasil simulasi secara 2D dan 3D diawali dengan hipotesa hasil performa turbin 2D akan lebih baik dari 3D karena sifat permodelan dianggap ideal dan sama searah sumbu span rotor sehingga dapat diwakilkan dengan sebuah geometri 2D. Performa yang akan dianalisa adalah Torsi yang dihasilkan oleh putaran turbin dan hasil koefisien daya dari turbin tersebut.

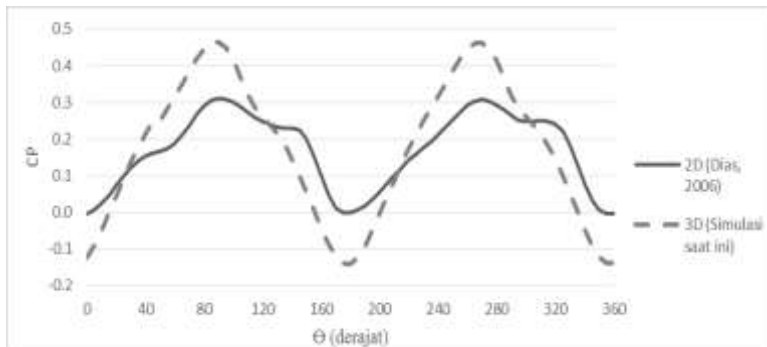
Hasil nilai torsi yang akan dibandingkan adalah pada variasi kecepatan angin. Pada tabel 4.3 akan ditunjukkan perbandingan nilai torsi dan koefisien daya yang dihasilkan dari penelitian 2D dan 3D.

Tabel 4. 3. Perbandingan hasil simulasi 2D dan 3D.

Simulasi	V (m/s)	TSR	Torsi rata- rata (N.m)	CT	CP
2D (Dias, 2016)	5	0,35	0,0194	0,233	0,080
	7	0,38	0,0376	0,230	0,086
	9	0,39	0,0627	0,232	0,090
	11	0,40	0,0925	0,229	0,092
	13	0,41	0,1245	0,221	0,090
	15	0,41	0,1564	0,209	0,086
3D (Hasil Saat Ini)	5	0,31	0,0012	0,197	0,062
	10	0,35	0,0057	0,242	0,086
	15	0,39	0,0119	0,223	0,088



Pada gambar kurva 4.5 akan ditunjukkan perbandingan nilai koefisien daya terhadap putaran dari turbin hasil simulasi 2D dan 3D.



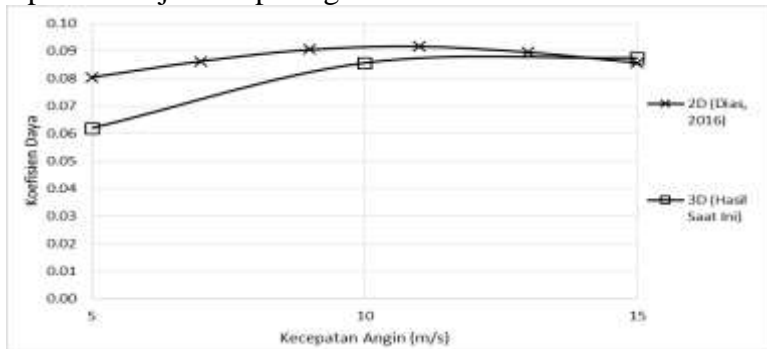
Gambar 4. 6. Perbandingan Nilai Koefisien daya terhadap Putaran pada Simulasi 2D dan 3D pada variasi Kecepatan Angin 15 m/s.

Dari kurva pada gambar 4.5 terlihat bahwa koefisien daya pada setiap daerajat putaran nilainya berbeda, hal tersebut terjadi karena pada saat adanya faktor perbedaan geometri 2D dan 3D, dimana meskipun nilai torsi untuk simulasi 2D lebih besar daripada 3D namun luas sapuan aliran fluida pada turbin memiliki nilai yang berbeda. Bila dilihat dari hasil perhitungan koefisien daya turbin, ternyata hasil dari simulasi 2D memiliki nilai koefisien daya rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil simulasi 3D untuk kecepatan 5 dan 10 m/s. Perbandingan nilai Koefisien daya turbin terhadap variasi kecepatan angin dapat dilihat pada kurva pada gambar 4.6.

Secara umum hasil performa turbin dari simulasi 2D menunjukkan nilai CP yang lebih baik. Dari berbagai variasi kecepatan angin didapatkan bahwa CP yang ditunjukkan



oleh hasil simulasi 2D lebih tinggi dari hasil simulasi 3D seperti ditunjukkan pada gambar kurva 4.7.



Gambar 4. 7. Perbandingan Nilai Koefisien Daya terhadap Variasi Kecepatan Angin pada Simulasi 2D dan 3D.

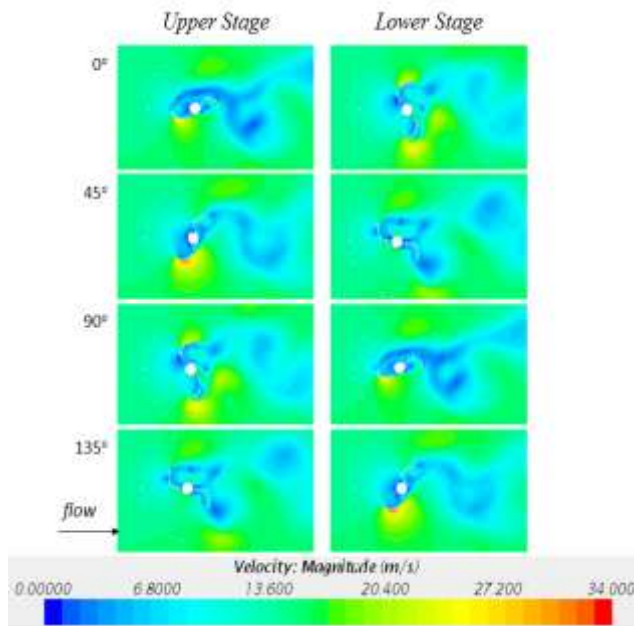
Pada kecepatan 15 m/s nilai koefisien daya pada simulasi 3D lebih tinggi dari simulasi 2D karena adanya pengaruh nilai momentum aliran yang tinggi, nilai Koefisien Torsi yang lebih tinggi dan aspek luasan area sapuan sudu turbin meskipun nilai *Tip Speed Ration*nya lebih rendah. Selain itu juga karena adanya momentum aliran yang tinggi maka efek adanya aliran sekunder yang mengganggu juga berkurang. Jadi secara umum dapat dikatakan bahwa CP 3D lebih rendah daripada 2D yang diakibatkan efek aliran 3D di daerah *endplate* pada sisi bawah dan atas turbin yang mengakibatkan luasan efektif aliran pada sudu berkurang, sehingga daya yang dapat diekstraksi lebih rendah.



4.4 KONFIGURASI MULTISTAGE

4.4.1 Konfigurasi *Dual Stage*

Penelitian secara simulasi ini dilanjutkan dengan spesimen kedua yakni sebuah Turbin Angin tipe Savonius dengan sudu *Semicircular* sebanyak dua buah pada konfigurasi *Dual Stage*. Hasil simulasi menunjukkan kontur kecepatan aliran fluida sebagai berikut yang dapat dilihat pada gambar 4.8.



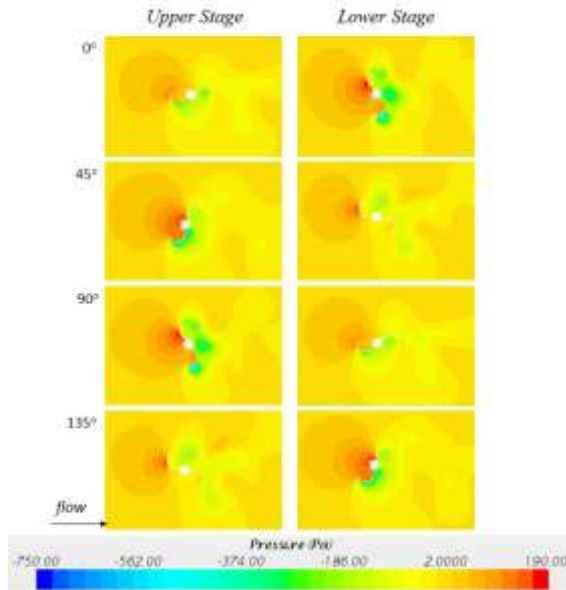
Gambar 4. 8. Kontur Kecepatan Aliran Melewati Turbin Angin Savonius Dual Stage pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.

Pada gambar 4.8 di atas menunjukkan kontur kecepatan aliran dari turbin angin konfigurasi *dual stage* dimana antara



upper stage dan *lower stage* diberikan jarak 90° putaran pada sudunya. Gambar kontur tersebut diambil pada irisan melintang di tengah sudu. Dari gambar kontur di atas, terlihat bahwa kecepatan tertinggi dari aliran yang melintasi turbin adalah saat melintasi sudu *advancing* pada kondisi putaran mencapai sudut 45° dan terlihat juga perkembangan wake pada saat turbin berputar. Perkembangan wake yang terjadi pada kedua *stage* relatif sama.

Sedangkan untuk kontur tekanan pada spesimen ini dapat dilihat pada gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4. 9. Kontur Tekanan Statis Aliran Melewati Turbin Angin Savonius Dual Stage pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.

Gambar kontur tekanan di atas menunjukkan adanya perbedaan gradien warna pada kontur yang mengindikasikan



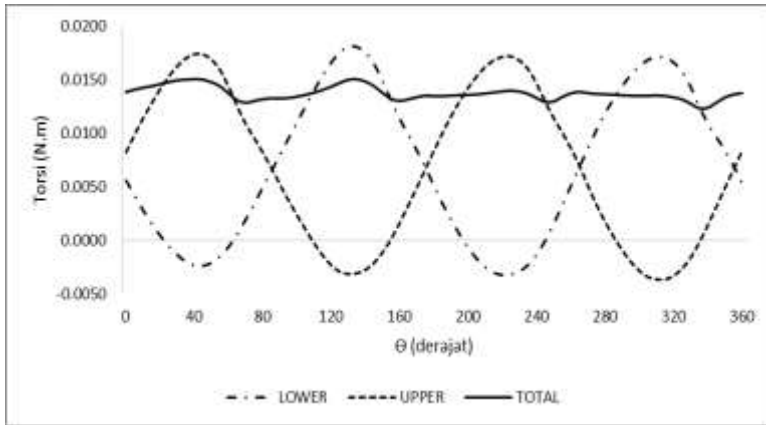
adanya perbedaan tekanan. Terlihat bahwa posisi putaran saat mencapai 45° hingga sudut 90° pada bagian *Upper Stage* terjadi perbedaan tekanan yang terbesar, sementara disaat yang bersamaan sudu turbin *Lower Stage* berada pada posisi 0 derajat dimana nilai torsinya paling rendah. Hal tersebut mengindikasikan adanya Torsi puncak untuk *Upper Stage* dan lembah pada *Lower Stage*. Hal sebaliknya juga terjadi pada saat sudu *Lower Stage* berada pada posisi 45° hingga 90° yang mencapai perbedaan tekanan tertinggi.

Hasil torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *dual stage* dapat dilihat pada table 4.4 berikut ini.

Tabel 4. 4. Hasil Torsi dari Turbin Angin Savonius *Dual Stage*.

V (m/s)	TSR	Torsi rata-rata (N.m)	CT	CP
5	0,31	0,0014	0,238	0,075
10	0,35	0,0061	0,254	0,090
15	0,39	0,0138	0,257	0,102

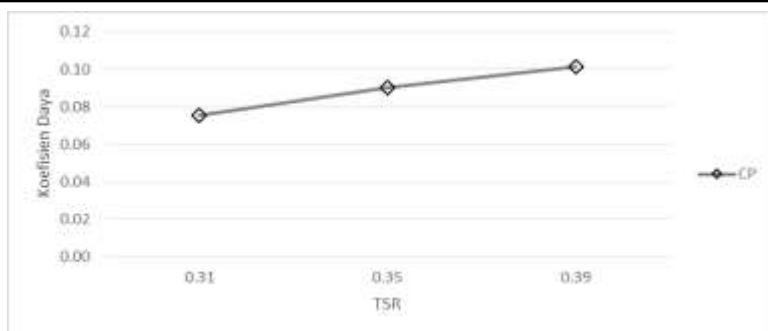
Torsi terbesar didapat pada saat kecepatan angin 15 m/s. Hal ini sesuai karena momentum aliran angin yang tinggi memungkinkan turbin untuk mengekstrak energi yang lebih besar akibat meningkatnya perbedaan besar gaya drag pada sudu *advancing* dan *returning*. Untuk melihat siklus torsi yang bekerja pada turbin yang berputar tersebut akan ditunjukkan pada gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4. 10. Siklus Torsi Turbin Angin Savonius *Dual Stage* pada berbagai Kecepatan Angin 15 m/s.

Siklus torsi yang terjadi pada turbin konfigurasi *dual stage* di atas menunjukkan karakter torsi yang memuncak akan terjadi secara bergantian antara bagian *Upper Stage* dan *Lower Stage*. Sedangkan Torsi total yang terjadi pada turbin angin akan dihitung dengan menjumlahkan kedua torsi tersebut.

Selanjutnya untuk perhitungan nilai dari Koefisien Daya (CP) yang bekerja pada Turbin Angin Savonius *Dual Stage* adalah dengan menggunakan torsi totalnya. Perubahan nilai Koefisien Daya terhadap Tip Speed Ratio dapat dilihat pada grafik 4.11 berikut ini.

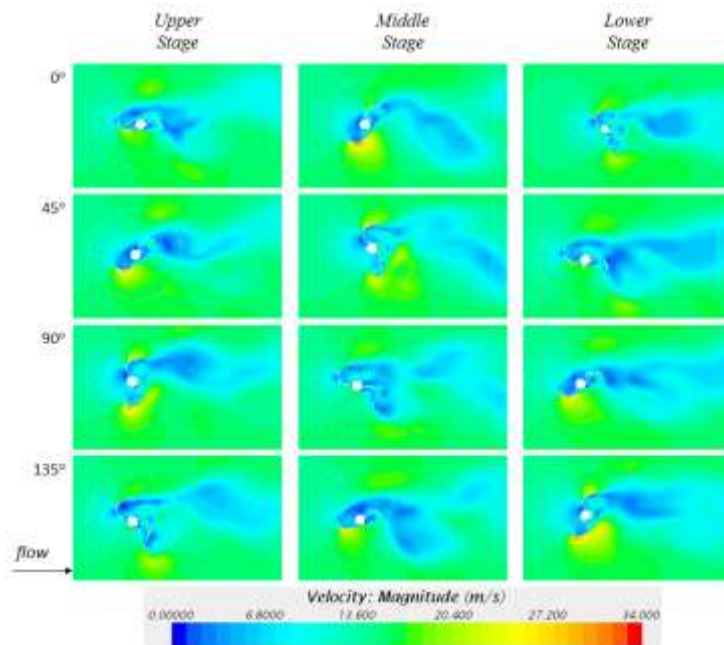


Gambar 4. 11. Kurva Nilai Koefisien Daya terhadap *Tip Speed Ratio* pada Turbin Angin Savonius *Dual Stage*.

Kurva tersebut menunjukkan bahwa Koefisien daya (CP) pada turbin akan naik seiring naiknya nilai *Tip Speed Ratio* Turbin Savonius *Dual Stage*. Karena seiring naiknya kecepatan angin maka momentum aliran yang menabrak sisi sudu *advancing* turbin juga akan naik, hal ini memungkinkan turbin untuk mengekstrak daya yang lebih besar. Selain itu adanya penambahan menjadi *Dual Stage* ini juga dapat meningkatkan performanya. Pada konfigurasi *Dual Stage* ini, performa terbaik diperlihatkan pada kondisi kecepatan angin 15 m/s.

4.4.2 Konfigurasi *Triple Stage*

Selanjutnya penelitian secara simulasi ini dilakukan dengan spesimen ketiga yakni sebuah Turbin Angin tipe Savonius dengan sudu *Semicircular* sebanyak dua buah pada konfigurasi *Triple Stage*. Hasil simulasi menunjukkan kontur kecepatan aliran fluida sebagai berikut yang dapat dilihat pada gambar 4.12.



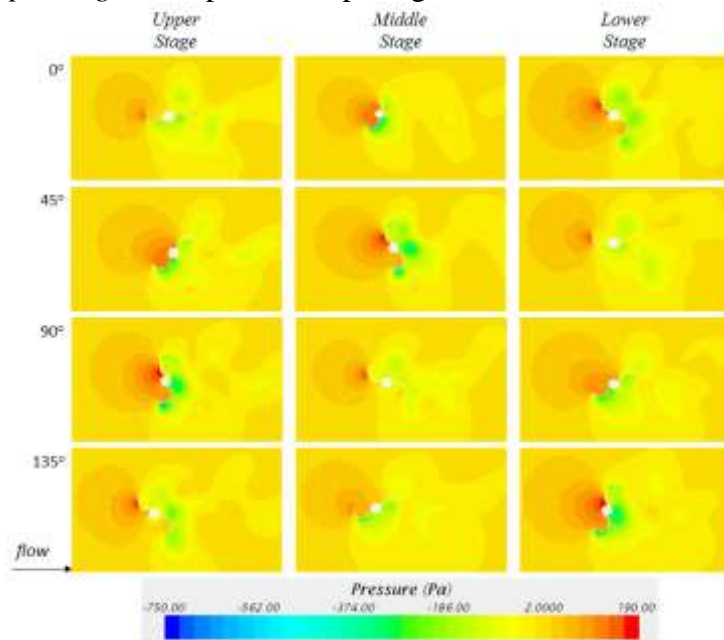
Gambar 4. 12. Kontur Kecepatan Aliran Melewati Turbin Angin Savonius *Triple Stage* pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.

Pada gambar 4.12 di atas menunjukkan kontur kecepatan aliran dari turbin angin konfigurasi *Triple stage* dimana antara *upper stage*, *middle stage* dan *lower stage* diberikan jarak 60° putaran. Gambar kontur tersebut diambil pada irisan melintang di tengah sudu pada setiap *stage*. Dari gambar kontur di atas, terlihat bahwa kecepatan tertinggi dari aliran yang melintasi turbin adalah saat melintasi sudu *advancing* pada masing-masing *stage* dicapai pada posisi sudut yang berbeda-beda. Hal tersebut disebabkan oleh konstruksi penempatan sudu masing-masing *stage* yang



dibuat berbeda-beda antara *stage* satu dan lainnya. Perkembangan *wake* yang terjadi pada ketiga *stage* relatif berbeda, hal tersebut diduga disebabkan oleh konstruksi penempatan sudut dan adanya aliran sekunder yang mengalir dari *stage* satu ke *stage* yang lainnya.

Untuk kontur tekanan pada konstruksi turbin angin *triple stage* ini dapat dilihat pada gambar 4.13 berikut ini.

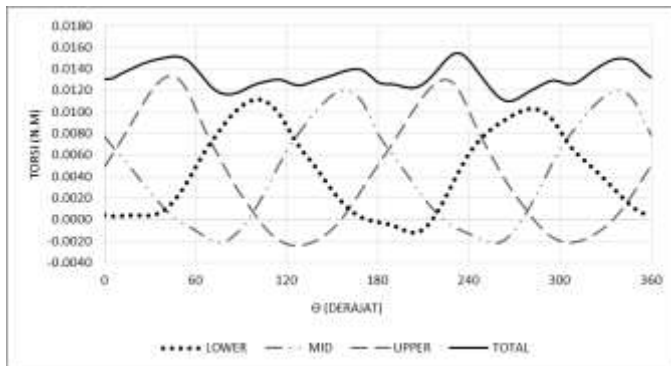


Gambar 4. 13. Kontur Tekanan Aliran Melewati Turbin Angin Savonius *Triple Stage* pada Berbagai Sudut dengan Kecepatan Angin 15 m/s.

Gambar kontur tekanan di atas menunjukkan adanya perbedaan gradien warna pada kontur yang mengindikasikan adanya perbedaan tekanan. Pada bagian *upper stage* terlihat



bahwa posisi putaran saat mencapai 45° hingga sudut 90° . Lalu pada saat bersamaan, bagian *middle stage* mengalami penurunan nilai perbedaan tekanan, sementara disaat yang bersamaan pula bagian *lower Stage* sedang mengalami kenaikan nilai perbedaan tekanan. Hal tersebut mengindikasikan adanya Torsi puncak untuk *Upper Stage*, lembah pada *Middle Stage* dan titik balik pada bagian *Lower Stage*. Kondisi ini terjadi secara bergantian sebagaimana ditunjukkan pada kurva siklus torsi turbin pada gambar 4.14 berikut ini.



Gambar 4. 14. Siklus Torsi Turbin Angin Savonius *Triple Stage* pada berbagai Kecepatan Angin 15 m/s.

Siklus torsi yang bekerja pada gambar 4.14 sesuai dengan gambar kontur tekanan. Dimana akibat adanya perbedaan tekanan akan menimbulkan adanya gaya yang bekerja pada sudu turbin angin, kemudian gaya tersebut akan berubah menjadi torsi karena adanya lengan gaya dari panjang jari-jari sudu.

Hasil torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Triple stage* dapat dilihat pada table 4.5 berikut ini.

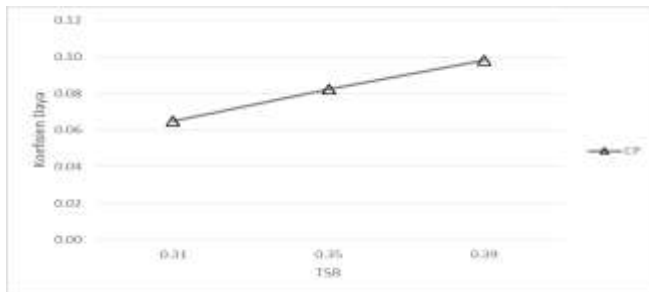


Tabel 4. 5. Hasil Torsi dari Turbin Angin Savonius *Triple Stage*.

V (m/s)	TSR	Torsi rata-rata (N.m)	CT	CP
5	0,31	0,0012	0,207	0,065
10	0,35	0,0055	0,233	0,083
15	0,39	0,0133	0,250	0,098

Torsi terbesar didapat pada saat kecepatan angin 15 m/s. Hal ini sesuai karena momentum aliran angin yang tinggi memungkinkan turbin untuk mengekstrak energi yang lebih besar akibat meningkatnya perbedaan besar gaya drag pada sudu *advancing* dan *returning*.

Selanjutnya untuk perhitungan nilai dari Koefisien Daya (CP) yang bekerja pada Turbin Angin Savonius *Dual Stage* adalah dengan menggunakan torsi totalnya. Perubahan nilai Koefisien Daya terhadap Tip Speed Ratio dapat dilihat pada grafik dalam gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4. 15. Kurva Nilai Koefisien Daya terhadap *Tip Speed Ratio* pada Turbin Angin Savonius *Triple Stage*.

Kurva tersebut menunjukkan bahwa Koefisien daya (CP) pada turbin akan naik seiring naiknya nilai *Tip Speed Ratio*

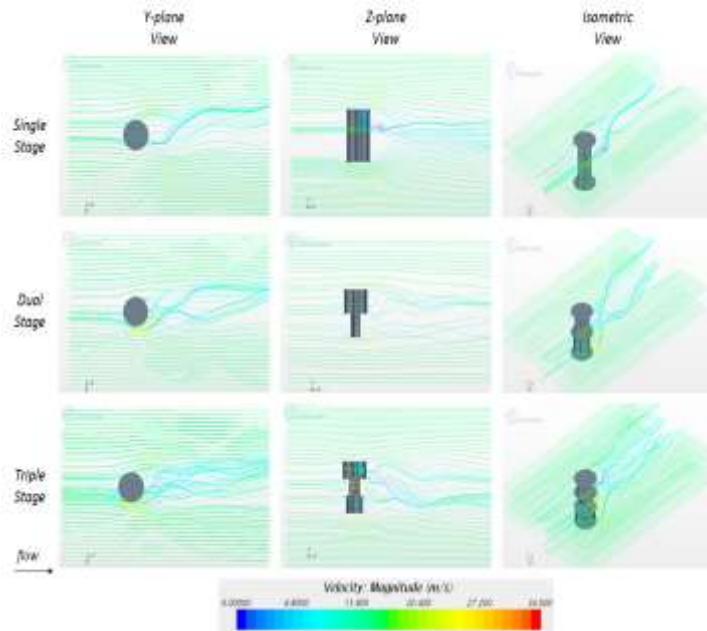


Turbin Savonius *Dual Stage*. Karena seiring naiknya kecepatan angin maka momentum aliran yang menabrak sisi sudu *advancing* turbin juga akan naik, hal ini memungkinkan turbin untuk mengekstrak daya yang lebih besar. Selain itu adanya penambahan menjadi *Dual Stage* ini juga dapat meningkatkan performanya. Pada konfigurasi *Dual Stage* ini, performa terbaik diperlihatkan pada kondisi kecepatan angin 15 m/s.

4.4.3 Perbandingan Variasi *Stage*

Pengamatan secara kualitatif selanjutnya dilakukan dengan melakukan perbandingan fenomena aliran yang melewati Turbin Angin Savonius pada masing-masing *stage*. Pada perbandingan ini digunakan data dari simulasi pada nilai input Kecepatan Angin sebesar 15 m/s dan kecepatan putaran turbin sebesar 1500 Rotasi per Menit (RPM).

Perbandingan fenomena aliran ini dilakukan dengan pengamatan pada *streamline* dari aliran angin. *Streamline* aliran fluida digambarkan oleh garis-garis dengan warna sebagai nilai besaran kecepatan. Gambar perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.16 di bawah ini.



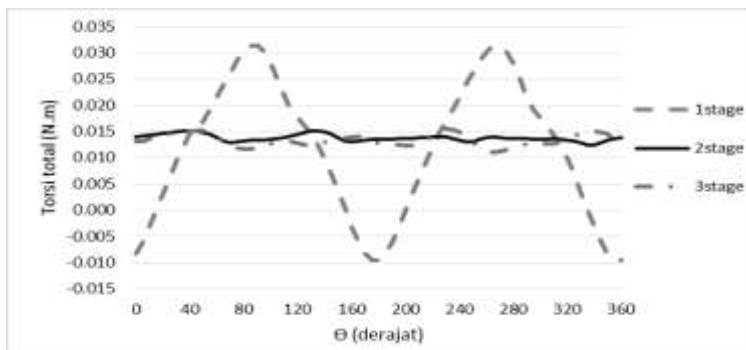
Gambar 4. 16. Perbandingan streamline aliran pada variasi Turbin Angin Savonius *Single Stage*, *Dual Stage* dan *Triple Stage*.

Dari gambar 4.16 dapat diamati bentuk *streamline* dari aliran fluida yang mengalir turbin angin dengan berbagai *stage*. Pada Turbin Savonius *Single Stage*, *streamline* fluidanya cenderung tidak menyimpang ke arah sumbu-Y namun masih dapat dilihat adanya penyempitan *streamtube* dan fenomena separasinya. Pada Turbin Savonius *Dual Stage*, *streamline* aliran fluida pada daerah downstream baik dari bagian *upper stage* maupun *lower stage* saling mengganggu satu sama lain. Sehingga daerah wake di belakang turbin *dual stage* akan lebih besar dari *single stage* akibat adanya wake dari masing-masing *stage* yang saling



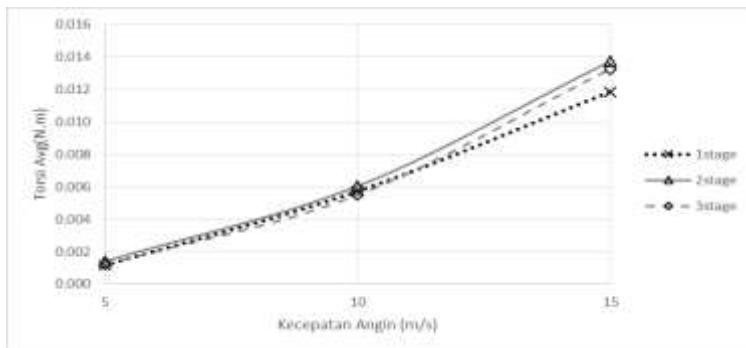
menginterferensi satu sama lain. Lalu pada Turbin Savonius *Triple Stage*, *streamline* aliran fluida pada daerah downstream semakin banyak yang bergerak acak baik pada sumbu-Y dan sumbu-X. Artinya bahwa aliran downstream dari *stage* satu dan lainnya saling mengganggu sehingga wake yang terjadi pun lebih besar daripada *dual stage*.

Fenomena aliran fluida yang berbeda pada setiap variasi jumlah *stage* tentunya akan mempengaruhi performa dari turbin itu sendiri. Evaluasi terhadap performa turbin itu sendiri dapat dilihat dengan perbandingan nilai Torsi rata-rata dan nilai Koefisien Daya yang dihasilkannya. Dari perbandingan fenomena yang terjadi tentunya nilai torsi yang dihasilkan masing-masing turbin juga berbeda. Nilai perbandingan torsi dapat dilihat pada kurva 4.17 mengenai perbandingan kurva total torsi yang dihasilkan dari turbin pada saat berputar.



Gambar 4. 17 Perbandingan nilai Torsi rata-rata pada variasi Turbin Angin Savonius *Single Stage*, *Dual Stage* dan *Triple Stage*.

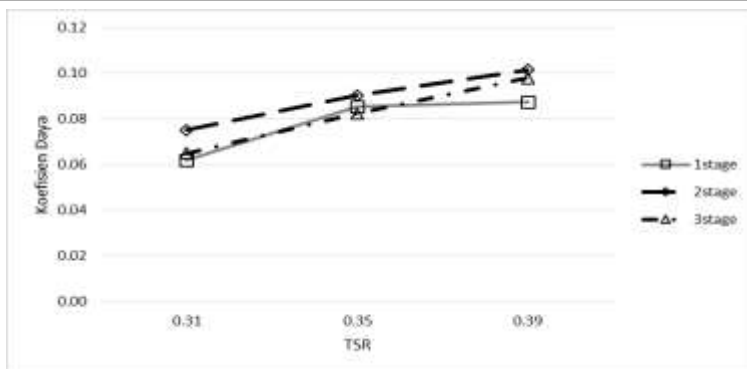
Sedangkan untuk perbandingan torsi rata-rata pada kecepatan angin yang berbeda dapat dilihat pada kurva 4.18.



Gambar 4. 18. Perbandingan nilai Torsi rata-rata pada variasi Turbin Angin Savonius *Single Stage*, *Dual Stage* dan *Triple Stage*.

Pada kurva 4.18 tentang perbandingan tersebut terlihat bahwa pada saat kondisi kecepatan angin rendah, nilai Torsi rata-rata yang dihasilkan turbin relatif sama besar. Namun seiring naiknya kecepatan angin akan terlihat perbedaan nilai torsi akibat adanya penambahan jumlah *stage*. Pada konstruksi *dual stage* didapatkan performa hasil torsi rata-rata yang terbaik bila dibandingkan dengan *single stage* atau pun *triple stage*.

Sedangkan untuk evaluasi dari nilai Koefisien Daya dari turbin angin ditunjukkan pada gambar 4.19 di bawah ini.



Gambar 4. 19. Perbandingan nilai Koefisien Daya pada variasi Turbin Angin Savonius *Single Stage*, *Dual Stage* dan *Triple Stage*.

Hasil perbandingan nilai Koefisien Daya pada variasi jumlah *stage* ternyata menunjukkan kemiripan dengan kurva perbandingan Torsi rata-rata, dimana didapatkan bahwa konstruksi *Dual Stage* lah yang menunjukkan performa nilai Koefisien daya yang tertinggi. Hal ini disebabkan karena memang perhitungan dari Koefisien daya pada turbin angin itu sendiri berbanding lurus dengan nilai dari Torsi rata-rata yang bekerja. Pada konstruksi *single stage* dan *triple stage* hasil dari perbandingan kuantitatif nilai Torsi rata-rata dan Koefisien daya masih menunjukkan hasil performa *triple stage* yang lebih baik meskipun perbandingan kuantitatif dari bentuk *streamline* alirannya lebih buruk, hal tersebut dikarenakan adanya keuntungan dalam penambahan jumlah *stage* dalam meningkatkan performa turbin Angin.

Pada data TSR 0,35 yang diambil pada kecepatan angin 10 m/s dan putaran 900 RPM terjadi *switching* pada kurva *triple stage* dan *single stage*. Hal tersebut bisa terjadi karena beberapa factor, diantaranya keterbatasan komputasi



akibat adanya perbedaan jumlah mesh yang dipengaruhi oleh geometri benda uji dan perbedaan fenomena aliran fluida yang berhasil ditangkap oleh *software* komputasi akibat adanya perbedaan kualitas mesh yang dibuat sehingga menyebabkan adanya perbedaan data. Perbedaan data yang didapatkan tersebut dapat dilihat pada kurva 4.18, memang data yang didapatkan nilai perbedaannya kecil namun ternyata dapat menghasilkan perbedaan hasil perhitungan yang cukup terlihat seperti pada kurva 4.19, sehingga pada saat dibuat kurva terjadi *switching*. Sedangkan pada data TSR 0,31 dan 0,39 yang diambil pada kecepatan angin 5 dan 15 m/s urutan performa konstruksi turbin sudah sesuai urutannya. Jadi secara umum performa terbaik ditunjukkan oleh turbin *Dual Stage*, lalu diikuti oleh *Triple Stage* kemudian *Single Stage*.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian simulasi numerik mengenai Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Single*, *Dual* dan *Triple Stage* pada variasi kondisi Kecepatan angin 5, 10 dan 15 m/s ini yakni bahwa:

- 1) Simulasi secara 3D membuktikan bahwa fenomena aliran dekat daerah *endwall* berbeda dengan daerah *mid-span* sudu. Selain itu juga adanya pengaruh interaksi aliran *downstream* dari daerah *endwall* ke arah *mid-span* yang mengakibatkan luasan efektif aliran berkurang sehingga besar torsi maupun CP simulasi 3D lebih rendah dari 2D.
- 2) Ditinjau dari hasil nilai torsi dan CP dari data penelitian ini didapatkan bahwa performa terbaik ditunjukkan oleh Turbin Angin Savonius Dua Sudu dengan konstruksi *Dual Stage*. Diikuti dengan konstruksi *Triple Stage* lalu *Single Stage*.

5.2 REKOMENDASI

Adapun rekomendasi yang diberikan untuk kebaikan dan kemajuan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut ini:

1. Diperlukan adanya studi lebih lanjut dengan kondisi operasi kecepatan angin maupun TSR yang lebih tinggi dari kondisi operasi dan konstruksi seperti pada penelitian ini agar titik puncak dan batas performa optimum operasi Turbin Angin Savonius ini dapat diketahui.
2. Diperlukan adanya studi perbandingan antara Turbin Angin Savonius Multistage pada konstruksi tinggi rotor (h) konstan tanpa melihat penambahan jumlah *stage* dan konstruksi tinggi rotor (h) berubah seiring penambahan jumlah *stage*.



-
3. Penelitian lebih lanjut dengan perbedaan bentuk sudu dapat dilakukan untuk membandingkan hasil performa turbin kondisi dan geometri seperti pada penelitian ini.
 4. Diperlukan studi perbandingan hasil penelitian metode simulasi ini dengan hasil penelitian metode eksperimen pada kasus konstruksi turbin yang sama.



DAFTAR PUSTAKA

Akwa, J.V., Vielmo, H.A., Petry, A.P. 2012. *A Review on the Performance of Savonius Wind Turbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 16, pp. 3054-3064.

Beri, H., and Yao, Y. 2011. *Effect of Camber Airfoil on Self Starting of Vertical Axis Wind Turbine*. Journal of Environmental Science and Technology, 4(pp. 302-312.

Consul, C. A., Willden, R. H. J., Ferrer, E., and Mcculloch, M. D. 2009. *Influence of Solidity on the Performance of a Cross-Flow Turbine*. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden.

Dai, Y. M., and Lam, W. 2009. *Numerical Study of Straight-Bladed Darrieus-Type Tidal Turbine*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 162(2), pp. 67 -76.

Danao, L. A. M. 2012. *The Influence of Unsteady Wind on the Performance and Aerodynamics of Vertical Axis Wind Turbines*. Ph.D Dissertation of Mechanical Engineering Department, University of Sheffield

Driss, Zied, etc. 2014. *Numerical simulation and experimental validation of the turbulent flow around a small incurved Savonius wind rotor*. Journal of Energy Vol. 74. Pp. 506-517.

Dwiyantoro B.A., Suphandani, Vivien, Rahman. 2015. *Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin*



Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus-Savonius. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV).

Fox R.W., Pritchard P.J., McDonald A.T., 2010, *“Introduction to Fluid Mechanics 7th”*, John Wiley & Sons, Inc, Singapore.

Frikha, Sobhi, etc. 2016. *Numerical and experimental characterization of multi-stage Savonius rotors*. Journal of Energy Vol. 114, pp. 382-404.

Howell, R., Qin, N., Edwards, J., and Durrani, N. 2010. *Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical Axis Wind Turbine*. Renewable Energy, 35(2), pp. 412-422.

Hutomo, G.P.C.T. 2015. *Investigasi Numerik Pengaruh Kondisi Angin yang Berfluktuasi dan Dynamic Stall pada Vertical Axis Wind Turbine Airfoil*. Surabaya: Teknik Mesin FTI-ITS. Indonesia.

Kang, Can, Liu, Haixia, Yang, Xin. 2014. *Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors*. Journal of Renewable and Sustainable Energy Vol. 33 pp 499-508.

Leishman, J.G. 2006. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge Aerospace Series, vol. 18. Cambridge University Press, Cambridge.

Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., 2003. *Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model*. Turbulence, Heat and Mass Transfer IV, K. Hanjalic, et al., eds. Antalya, Turkey, pp. 625–632.

Nasef M.H., El-Askary W.A., Abdel-Hamid A.A., Gad H.E. 2013. *Evaluation of Savonius Rotor Performance*:



Static and Dynamic Studies. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 123, pp. 1-11.

Qin, N., Howell, R., Durrani, N., Hamada, K., Smith, T. 2011. Unsteady Flow Simulation and Dynamic Stall Behaviour of Vertical Axis Wind Turbine Blades. *Wind Engineering* Vol. 35, no. 4, 2011 PP 511-510

Riswantarbi, A.A. 2016. Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Pengganggu di Depan *Returning Blade* Terhadap Performa Turbin Angin Savonius. Surabaya: Teknik Mesin FTI-ITS. Indonesia.

Saha, U.K., Maity D. 2008. *Optimum Design Configuration of Savonius Rotor through Wind Tunnel Experiments*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 96, No. 8, pp. 1359-1375.

Simão Ferreira, C. J., Van Brussel, G. J. W., and Van Kuik, G. 2007. *2D CFD Simulation of Dynamic Stall on a Vertical Axis Wind Turbine: Verification and Validation with PIV Measurements*. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada.

Sunandi. M.F.D. 2016. Studi Numerik Turbin Angin Savonius dengan Variasi Jumlah Sudu dan Kecepatan Angin. Surabaya: Teknik Mesin FTI-ITS. Indonesia.

Untaroiu, A., Wood, H. G., Allaire, P. E., and Ribando, R. J. 2011. *Investigation of Self-Starting Capability of Vertical Axis Wind Turbines Using a Computational Fluid Dynamics Approach*. Journal of Solar Energy Engineering, 133(4), pp. 041010-8.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



RIWAYAT PENULIS



Surya Wijaya lahir di Kota Surabaya pada 15 April 1994, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan secara formal mulai dari jenjang Sekolah Dasar di SDN Lidah Wetan III / 463 Lakarsantri, Surabaya (2000-2006). Lalu Sekolah Menengah Pertama pada SMP Negeri 12 Surabaya (2006-2009). Kemudian Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 5

Surabaya. Atas dasar dorongan pribadi dan keluarga akhirnya Penulis memilih untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang selanjutnya pada tingkat Setrata 1 (S1) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri (FTI) pada Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya (2012-2017). Menjelang akhir studi, Penulis mengambil bidang Konversi Energi untuk menyelesaikan tugas akhir dengan topik tentang Turbin Angin.

Selama menjalani masa perkuliahan, Penulis banyak memperoleh kesempatan untuk belajar, menggali dan mengembangkan keperibadian diri lewat organisasi serta berbagai kegiatan yang diadakan oleh mahasiswa di kampus. Beberapa kegiatan yang pernah diikuti oleh Penulis antara lain berkaitan dengan organisasi mahasiswa seperti Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM), Society of Petroleum Engineer (SPE) ITS-Student Chapter, Mechanical English Community dan Asisten Laboratorium Mekanika Fluida.



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



LAMPIRAN